

Prevención y control integrados de la contaminación (IPPC).

Documento de referencia de Mejores Técnicas Disponibles
en la Industria de Fabricación de Vidrio

Documento BREF



MINISTERIO
DE MEDIO AMBIENTE

DIRECCIÓN GENERAL
DE CALIDAD
Y EVALUACIÓN AMBIENTAL



Prevención y Control Integrados de la Contaminación (IPPG)

Documento de referencia de Mejores Técnicas Disponibles
en la Industria de Fabricación de Vidrio

Documento BREF



SECRETARIA GENERAL
PARA LA PREVENCIÓN
DE LA CONTAMINACIÓN
Y EL CAMBIO CLIMÁTICO

DIRECCIÓN GENERAL
DE CALIDAD
Y EVALUACIÓN AMBIENTAL



Comisión Europea

2004

Fotografía de cubierta:Vidrio España

Versión Noviembre 2001

Traducción al español realizada por el
Ministerio de Medio Ambiente

Edita: Centro de Publicaciones
Secretaría General Técnica
Ministerio de Medio Ambiente ©

I.S.B.N.: 84-8320-277-8

NIPO: 310-04-043-6

Depósito Legal: M - 40728 - 2004

Fotomecánica: Punto Sur S.L.

Imprime: Gráficas DEVA, S.L.

Impreso en papel reciclado

NOTA INTRODUCTORIA

El 1 de julio de 2002 se aprobó la Ley 16/2002 de Prevención y Control Integrados de la Contaminación, que incorpora a nuestro ordenamiento jurídico la Directiva 96/61/CE.

La ley exige un enfoque integrado de la industria en su entorno y el conocimiento, por parte de todos los implicados -industria, autoridades competentes y público en general- de las Mejores Técnicas Disponibles con el fin de reflejar todos estos aspectos en la Autorización Ambiental Integrada, que otorgan las CC.AA.

En el marco de la Unión Europea, se establece un intercambio de información entre los EE.MM. y las industrias para la elección de estas MTDs, que deben servir de referencia común para los Estados Miembros a la hora de marcar el objetivo de mejora tecnológica de las diferentes actividades.

A tal efecto, la Comisión Europea a través de la Oficina Europea de IPPC (European Integrated Pollution Prevention and Control Bureau) ha organizado una serie de grupos de trabajo técnico, que por epígrafes y actividades proponen a la Comisión los Documentos de Referencia Europeos de las Mejores Técnicas Disponibles (**BREF**).

Los BREF informarán a las autoridades competentes sobre qué es técnica y económicamente viable para cada sector industrial en orden a mejorar sus actuaciones medioambientales y consecuentemente lograr la mejora del medio ambiente en su conjunto.

El Grupo de Trabajo correspondiente a la Industria de Fabricación de Vidrio comenzó sus trabajos en el año 1998, y el documento final se hizo público en diciembre de 2001: *Reference Document on Best Available Techniques in the Glass Manufacturing Industry*.

Está disponible, exclusivamente en versión inglesa, en la web de la Oficina Europea de IPPC (<http://eippcb.jrc.es>.), y en la web de la Comisión Europea (<http://europa.eu.int/comm/environment/pubs/industry.htm>).

Este Documento BREF de la Industria de Fabricación de Vidrio fue aceptado por el Foro de Intercambio de Información en septiembre de 2000 y fue aprobado por la Comisión Europea el 16 de enero de 2002.

El Ministerio de Medio Ambiente ha asumido la tarea, de acuerdo con los mandatos de la Directiva IPPC y de la Ley 16/2002, de llevar a cabo un correcto intercambio de información en materia de Mejores Técnicas Disponibles, para ello, ha iniciado una serie de traducciones de los documentos BREF europeos.

Se pretende dar un paso más en la adecuación progresiva de la industria española a los principios de la Ley 16/2002 cuya aplicación efectiva debe conducir a una mejora del comportamiento ambiental de las instalaciones afectadas que las haga plenamente respetuosas con el medio ambiente.

La versión española de este documento está disponible en la web de EPER España (www.eper-es.com).

SUMARIO EJECUTIVO

1. INTRODUCCIÓN

Este Documento de Referencia sobre las Mejores Técnicas Disponibles (MTD) en la industria del vidrio refleja el intercambio de información realizado conforme al Artículo 16(2) de la Directiva del Consejo 96/61/CE. El documento debe contemplarse a la luz del prefacio, en el que se describen sus objetivos y su uso.

Este documento cubre las actividades industriales especificadas en las Secciones 3.3 y 3.4 del Anexo 1 de la Directiva 96/61/CE, a saber:

- 3.3 Instalaciones de fabricación de vidrio, incluida la fibra de vidrio, con una capacidad de fusión superior a 20 toneladas por día.
- 3.4 Instalaciones para la fundición de materiales minerales, incluida la fabricación de fibras minerales con una capacidad de fundición superior a 20 toneladas por día.

A los efectos de este documento, las actividades industriales englobadas por estas dos descripciones de la Directiva se denominan industria del vidrio, que se considera compuesta por ocho sectores. Esta división en sectores se basa en los productos fabricados, pero inevitablemente hay una cierta superposición entre ellos. Los ocho sectores son: vidrio para envases; vidrio plano; fibra de vidrio de filamentos continuos; vidrio para uso doméstico; vidrio especial (incluido vidrio soluble), lana mineral (con dos subsectores, lana de vidrio y lana de roca); fibra cerámica; y fritas.

El documento se compone de siete capítulos y una serie de anexos que contienen información suplementaria. Los siete capítulos y cuatro anexos son:

1. Información General
2. Técnicas y Procesos Aplicados
3. Niveles Actuales de Emisiones y Consumo
4. Técnicas a Considerar en la Determinación de las MTD
5. Conclusiones sobre MTD
6. Técnicas Emergentes
7. Conclusiones y Recomendaciones
8. Anexo I Ejemplo de datos de emisiones de una instalación
9. Anexo II Ejemplo de balances de azufre
10. Anexo III Medición de Emisiones
11. Anexo IV Legislación de los Estados Miembros

El objetivo del resumen general es resumir los principales hallazgos del documento. Debido a la naturaleza del documento principal, es imposible presentar todas sus complejidades y sutilezas en un resumen tan corto. Por consiguiente, se hace referencia al texto principal, y debe subrayarse que sólo el documento principal en su totalidad debe ser usado como referencia en la determinación de las MTD para cualquier instalación particular. Basar tales decisiones únicamente en el resumen general podría hacer que la información se tomara fuera de contexto y se malinterpretaran las complejidades de los temas tratados.

2. LA INDUSTRIA DEL VIDRIO

El Capítulo 1 proporciona información general acerca de la industria del vidrio. Su finalidad principal es proporcionar una comprensión básica de la industria en su conjunto para ayudar a las personas que toman decisiones a ver la información que se proporciona más adelante en el documento, en contexto con el amplio abanico de influencias que afectan a la industria.

La industria del vidrio en la Unión Europea (UE) es extremadamente diversa, tanto en los productos fabricados como en las técnicas de fabricación empleadas. Los productos van desde sofisticadas copas de vidrio al plomo elaboradas a mano hasta grandes volúmenes de vidrio flotado producidos para los sectores de construcción y automoción. Las técnicas de fabricación varían desde pequeños hornos eléctricos en el sector de fibras cerámicas a hornos regenerativos de llama transversal en el sector del vidrio plano con producciones de hasta 700 toneladas al día. La industria del vidrio más amplia incluye asimismo muchas instalaciones pequeñas que no llegan al umbral de 20 toneladas diarias del Anexo 1 de la Directiva.

La industria del vidrio es esencialmente una industria de artículos, aunque se han desarrollado muchos modos de añadir valor a productos de gran volumen para asegurar que la industria se mantenga competitiva. Más del 80% de la producción de la industria se vende a otras industrias, y la industria del vidrio en su conjunto depende mucho del sector de la construcción, así como del sector alimentario y de bebidas. No obstante, algunos de los sectores de menor volumen producen productos técnicos o de consumo de alto valor.

La producción total estimada de la industria del vidrio dentro de la UE en 1996 fue de 29 millones de toneladas (excluidas fibras cerámicas y fritas). En la tabla siguiente se facilita un desglose orientativo por sectores:

Sector	% de la Producción Total de la UE (1996)
Vidrio para Envases	60
Vidrio Plano	22
Fibra de Vidrio de Filamentos Continuos	1,8
Vidrio Doméstico	3,6
Vidrio Especial	5,8
Lana Mineral	6,8

Desglose aproximado por sectores de la producción de la industria del vidrio (excluidos los sectores de fibra cerámica y fritas)

El Capítulo 1 proporciona información para cada sector en los siguientes apartados: visión general del sector, productos y mercados, consideraciones comerciales y económicas, y principales temas medioambientales. Debido a la diversidad de la industria, la información facilitada es muy distinta para cada sector. Como ejemplo ilustrativo, la información dada para el sector de vidrio para envases se resume en el párrafo siguiente. Se facilita información comparable para todos los sectores si está disponible.

La producción de vidrio para envases es el mayor sector de la industria del vidrio de la UE, y representa alrededor del 60% de la producción total de vidrio. El sector cubre la producción de envases de vidrio, como botellas y frascos, aunque algunas vajillas fabricadas a máquina también pueden producirse en este sector. En 1997, el sector produjo más de 17,3 millones de toneladas de productos de vidrio en los 295 hornos en funcionamiento en la UE. Hay aproximadamente 70 empresas con 140 instalaciones. El vidrio para envases se produce en todos los Estados Miembros con excepción de Luxemburgo. El sector de bebidas representa aproximadamente el 75% del tonelaje total de envases de vidrio. La principal competencia es de los materiales de envase alternativos como acero, aluminio, compuestos de cartón y plásticos. Un importante desarrollo en este sector ha sido el uso creciente de vidrio reciclado. El porcentaje medio de reutilización de desechos de consumo dentro del sector de vidrio para envases en la UE es de aproximadamente el 50% del aporte total de materia prima, y algunas instalaciones utilizan hasta un 90% de vidrio reciclado.

3. PROCESOS Y TÉCNICAS APLICADAS

El Capítulo 2 describe los procesos y técnicas de fabricación utilizados comúnmente en la industria del vidrio. La mayoría de procesos pueden dividirse en cinco etapas básicas: manipulación de materias primas; fusión; conformado; recocido y embalaje.

La diversidad de la industria del vidrio hace que se utilice una amplia gama de materias primas. Las técnicas empleadas para la manipulación de materias primas son comunes a muchas industrias y se describen en la Sección 2.1 del BREF. El aspecto principal es el control del polvo de la manipulación de los finos de las materias primas (Ej. arena silícea, vidrio de desecho), materias primas intermedias/modificantes (Ej. carbonato sódico, caliza, feldespato) y agentes colorantes/decolorantes (Ej. cromito férrico, óxido de hierro).

La fusión, la combinación de las distintas materias primas a temperatura elevada para formar vidrio fundido es la fase central en la producción de vidrio. El proceso de fusión es una combinación compleja de reacciones químicas y procesos físicos, y la fusión puede dividirse en varias etapas: calentamiento; fusión primaria; afino y homogeneización; y acondicionamiento.

Las principales técnicas de fusión se resumen a continuación. En los sectores de lana de vidrio y frías se utilizan técnicas distintas, y estas técnicas se describen en detalle en el documento principal. La elaboración de vidrio es una actividad muy intensiva desde el punto de vista energético, y la elección de la fuente de energía, técnica de calentamiento y método de recuperación de energía son primordiales en el diseño del horno. Las mismas elecciones son también algunos de los factores primordiales que afectan el comportamiento medioambiental y la eficacia energética de la operación de fusión. Las tres principales fuentes de energía para la fabricación de vidrio son gas natural, fuel-oil y electricidad.

Los hornos regenerativos utilizan sistemas regenerativos de recuperación de calor. Los quemadores están normalmente situados en tomas de aire de combustión / gases residuales o bajo las mismas. El calor de los gases residuales se utiliza para precalentar el aire antes de la combustión, pasando los gases residuales a través de una cámara que contiene material refractario, que absorbe el calor. El horno sólo quema en un lado a la vez. Al cabo de unos veinte minutos, la combustión se invierte y el aire de combustión pasa a través de la cámara previamente calentada por los gases residuales. Así pueden obtenerse temperaturas de precalentamiento de hasta 1400 °C lo que produce eficacias térmicas muy altas. En el horno regenerativo de llama transversal, la toma de combustión y los quemadores están situados a lo largo de los lados del horno, y las cámaras regenerativas están situadas también a ambos del horno. En el horno regenerativo de llama de bucle, los principios de funcionamiento son los mismos, aunque las dos cámaras regenerativas están situadas en un extremo del horno.

Los hornos de recuperación utilizan intercambiadores de calor (denominados recuperadores) para recuperación de calor, con precalentamiento continuo del aire de combustión por los gases residuales. Las temperaturas de precalentamiento del aire están limitadas a unos 800 °C para recuperadores metálicos. La capacidad de fusión específica (por unidad de superficie del horno de fusión) de los hornos de recuperación es aproximadamente un 30% menor que para un horno regenerativo. Los quemadores están situados a lo largo de cada lado del horno, transversales a la circulación del vidrio, y queman continuamente desde ambos lados. Este tipo de horno se utiliza principalmente cuando se requiere una elevada flexibilidad de operación con una inversión inicial mínima, particularmente cuando la escala de la operación es demasiado reducida para hacer viable económicamente el uso de regeneradores. Es más apropiado para instalaciones de pequeña capacidad, aunque no son infrecuentes hornos de mayor capacidad (hasta 400 toneladas al día).

Los hornos de oxícombustión sustituyen el aire de combustión por oxígeno (pureza >90%). La eliminación de la mayoría del nitrógeno de la atmósfera de combustión reduce el volumen de los gases residuales en unos dos tercios. Por lo tanto, puede obtenerse ahorro energético en el horno, ya que no es necesario calentar el nitrógeno atmosférico a la temperatura de las llamas. La formación de NOx térmico se reduce también enormemente. En general, los hornos de oxícombustión tienen el mismo diseño básico que

las unidades fundidoras, con múltiples quemadores laterales y una sola toma de escape de gases residuales. No obstante, los hornos diseñados para combustión con oxígeno no utilizan sistemas de recuperación de calor para precalentar el suministro de oxígeno a los quemadores.

Los hornos eléctricos consisten en una caja con revestimiento refractario soportada por un cuerpo de acero, con electrodos insertados desde el lado, la parte superior, o más frecuentemente la parte inferior del horno. La energía para la fusión es aportada por el calentamiento resistivo al pasar la corriente a través del vidrio fundido. Hay un límite superior de tamaño por lo que respecta a la viabilidad económica de los hornos eléctricos, que depende del coste de la electricidad en comparación con los combustibles fósiles. La supresión de los combustibles fósiles del horno elimina la formación de productos de combustión.

La fusión combinada con combustibles fósiles y electricidad puede adoptar dos formas: combustión predominantemente con combustible fósil con un refuerzo eléctrico, o calentamiento predominantemente eléctrico con apoyo de combustible fósil. El refuerzo eléctrico es un método de agregar calor adicional a un horno de vidrio haciendo pasar una corriente eléctrica a través de electrodos situados en fondo de la cuba. Una técnica menos común es el uso de gas o fuel-oil como combustible de apoyo para un horno con calentamiento primordialmente eléctrico.

Los hornos de fusión discontinuos se utilizan cuando se requieren cantidades menores de vidrio, particularmente si la formulación del vidrio cambia regularmente. En estos casos se emplean hornos de crisoles u hornos diarios para fundir lotes específicos de materia prima. Muchos procesos de vidrio de este tipo no estarían bajo el control de la IPPC ya que suelen tener menos de 20 toneladas diarias de capacidad de fusión. Básicamente, un horno de crisoles consiste en una sección inferior para precalentar el aire de combustión y una sección superior que calienta los crisoles y sirve como cámara de fusión. Los hornos diarios han sido desarrollados a partir de hornos de crisoles para disponer de mayores capacidades, del orden de 10 toneladas diarias. Estructuralmente son más semejantes al cuadrángulo de un horno convencional, pero se siguen llenando con mezcla cada día.

Se han creado **diseños especiales de hornos de fusión** para mejorar la eficacia y comportamiento medioambiental. Los más conocidos de este tipo de horno son el horno de fusión de bajo nivel de NOx (LoNOx) y el Flex Melter.

En los párrafos siguientes se detallan aspectos de los principales procesos y técnicas empleados en la industria para cada sector.

El sector de **vidrio para envases** es diverso, y en él se utilizan casi todas las técnicas de fusión arriba descritas. El proceso de conformado se realiza en dos etapas, el formado inicial de la pieza en bruto mediante presión con un émbolo, o soplando con aire comprimido, y la operación de moldeo final mediante soplado para obtener la forma hueca acabada. Estos dos procesos se denominan pues respectivamente “prensado y soplado” y “soplado y soplado”. La producción de envases se realiza de forma casi exclusiva mediante máquinas IS (de Sección Individual).

El **vidrio plano** se produce casi exclusivamente con hornos regenerativos de llama transversal. El principio básico del proceso de flotado es verter el vidrio fundido sobre un baño de estaño fundido, y formar una lámina de caras plano-paralelas por influencia de la diferencia de densidad y tensión superficial entre el vidrio y el estaño fundido. A la salida del baño de flotación, la lámina de vidrio pasa a un túnel de recocido, enfriándose gradualmente la lámina de vidrio para controlar las tensiones permanentes. Pueden aplicarse recubrimientos en línea (capas) para mejorar las características del producto (Ej. capas de baja emisividad).

La **fibra de vidrio de filamentos continuos** se produce mediante hornos de recuperación o de oxí-combustión. El vidrio fluye desde el horno a los antecuerpos, donde pasa a través de orificios. El vidrio se estira a través de las boquillas de los orificios para formar filamentos continuos. Los filamentos se estiran juntos y pasan a un transportador, donde se aplica un recubrimiento acuoso a cada filamento. Los filamentos recubiertos se recogen en bobinas para su proceso posterior.

El **vidrio doméstico** es un sector diverso que incluye una amplia gama de productos y procesos. Va desde el sofisticado vidrio al plomo fabricado a mano hasta métodos mecanizados de gran volumen utilizados para vajillas de producción en serie. Casi todas las técnicas de fusión descritas anteriormente se utilizan en el sector, desde hornos de crisoles a grandes hornos regenerativos. Los procesos de conformado son automáticos, manuales o semiautomáticos, y más tarde la producción de los artículo básicos puede estar sujeta a operaciones de acabado en frío (Ej. el vidrio al plomo se suele cortar y pulir).

El sector de **vidrio especial** es también un sector muy diverso, que cubre una amplia gama de productos que pueden diferir considerablemente en composición, método de fabricación y uso. Las técnicas más comunes son los hornos de recuperación, los hornos de oxi-gas, los hornos regenerativos, los hornos de fusión eléctricos, y los hornos diarios. La amplia gama de productos significa que dentro del sector se utilizan muchas técnicas de moldeo. Algunas de las más importantes son: producción por prensado y soplado; laminación (vidrio impreso); prensado, proceso en lámina; extrusión de tubos; proceso de estirado; y disolución (vidrio soluble).

Los hornos de **lana de vidrio** son normalmente hornos de fusión eléctricos, hornos de recuperación con combustión a gas, u hornos de oxicombustión. El vidrio fundido fluye a lo largo de un antecuerpo y a través de hileras de orificios a máquinas centrífugas giratorias. El fibrado es por acción centrífuga con estiramiento por los gases de combustión calientes. Se pulveriza sobre las fibras una solución acuosa de resina fenólica. La fibra recubierta con resina se lleva mediante aspiración a un transportador móvil y luego pasa a través de una estufa para secar y polimerizar el producto.

La **lana de roca** se produce normalmente con un cubilote de viento caliente con combustión de coque. El material se acumula en el fondo del cubilote y fluye a lo largo de una derivación a la máquina hiladora. Se utiliza aire para estirar las fibras y dirigirlas a los transportadores de recogida. Se pulveriza sobre las fibras una solución acuosa de resina fenólica. El resto del proceso es esencialmente como para la lana de vidrio.

La **fibra cerámica** se produce exclusivamente con hornos eléctricos. El material fundido se fibra mediante ruedas de alta velocidad o un chorro de aire a alta presión, y las fibras se recogen en una correa de recogida. El producto puede embalarse en este punto o ser procesado en plancha para ser embalado o enfurtido con agujas. También puede realizarse otros tratamientos de acabado.

La producción de **fritas** utiliza hornos en continuo y en discontinuo. Es frecuente producir lotes pequeños para una amplia gama de formulaciones. Los hornos de fritas son generalmente con combustión a gas o a fuel-oil, y muchas plantas de fritas utilizan oxicombustión. Los hornos continuos pueden tener llama transversal o de herradura con un solo quemador. Los hornos en discontinuo son hornos refractarios en forma de caja o cilíndricos, montados para permitir un grado de rotación. El material fundido puede enfriarse directamente en un baño de agua, o puede enfriarse entre rodillos refrigerados por agua para producir un producto en escamas.

4. NIVELES DE EMISIONES Y CONSUMOS

El Capítulo 3 proporciona información acerca de los rangos de niveles de emisiones y consumos que se encuentran en la industria del vidrio en el ámbito de los procesos y técnicas descritos en el Capítulo 2. Primero se discuten las entradas y salidas para la industria en su conjunto, y luego se hace una consideración más específica para cada sector. En este capítulo se detallan las características fundamentales de las emisiones, las fuentes de emisiones y los aspectos energéticos. La información tiene por finalidad permitir el estudio de los datos de emisiones y consumos de una determinada instalación para un permiso, viéndolos en contexto frente a otros procesos del mismo sector o la industria del vidrio en su conjunto.

Las entradas al proceso central pueden dividirse en cuatro categorías principales: materias primas (que forman parte del producto), energía (combustibles y electricidad), agua, y materias primas auxiliares (ayudas de proceso, agentes de limpieza, agentes de tratamiento del agua, etc.). Las materias primas de la

industria del vidrio son principalmente compuestos inorgánicos sólidos, tanto minerales de origen natural como productos sintéticos. Van desde materiales muy gruesos a polvos muy finos. Los líquidos o gases se utilizan también ampliamente, como materias primas auxiliares y como combustibles

En el documento principal, la Tabla 3.1 detalla las materias primas más comunes utilizadas para la producción de vidrio. Las materias primas utilizadas en la conformación de los productos y otras actividades de acabado (Ej. aplicación de capas y aglutinantes) son más específicas para cada sector y se discuten en secciones posteriores. La industria del vidrio en su conjunto no es un gran consumidor de agua, y sus usos principales son la refrigeración, la limpieza y la humidificación en discontinuo. La fabricación de vidrio es un proceso intensivo desde el punto de vista energético y por lo tanto los combustibles pueden suponer un importante aporte a los procesos. Las principales fuentes de energía dentro de la industria del vidrio son fuel-oil, gas natural y electricidad. Los distintos aspectos de la energía y los combustibles se discuten en la Sección 3.2.3 y en las secciones específicas de cada sector.

Las salidas del proceso central pueden dividirse en cinco categorías principales: productos, emisiones a la atmósfera, efluentes líquidos residuales, residuos sólidos de proceso, y energía.

Todos los sectores de la industria del vidrio utilizan materias primas en polvo, granulares o que forman polvo. El almacenamiento y manipulación de estas materias primas representa un considerable potencial de emisiones de polvo.

Los principales retos medioambientales para la industria del vidrio son las emisiones a la atmósfera y el consumo de energía. La fabricación de vidrio es una actividad a alta temperatura y con un uso intensivo de energía, que produce la emisión de productos de combustión y la oxidación a alta temperatura del nitrógeno atmosférico, es decir, dióxido de azufre, dióxido de carbono y óxidos de nitrógeno. Las emisiones de los hornos contienen asimismo polvo y niveles bajos de metales. Se estima que en 1997 las emisiones de la industria del vidrio a la atmósfera consistieron en: 9.000 toneladas de polvo; 103.500 toneladas de NO_x; 91.500 toneladas de SO_x; y 22 millones de toneladas de CO₂ (incluida la producción de energía). Esto supuso alrededor del 0,7% de las emisiones totales de la UE de estas sustancias. El consumo total de energía de la industria del vidrio fue de aproximadamente 265 PJ. Las principales emisiones derivadas de las actividades de fusión en la industria del vidrio se resumen en la tabla siguiente:

Emisión	Fuente / Comentarios
Partículas	Condensación de componentes volátiles de las materias primas de mezcla. Arrastre de material fino de las materias primas de mezcla. Producto de la combustión de algunos combustibles fósiles.
Óxidos de Nitrógeno	NOx térmico debido a elevadas temperaturas del horno de fusión. Descomposición de los compuestos de nitrógeno de las materias primas de mezcla. Oxidación del nitrógeno contenido en los combustibles.
Óxidos de Azufre	Azufre en combustible. Descomposición de compuestos de azufre de las materias primas de mezcla. Oxidación del sulfuro de hidrógeno en operaciones con cubilotes.
Cloruros/HCl	Presentes como impurezas en algunas materias primas, particularmente carbonato sódico sintético. NaCl utilizado como materia prima en algunos vidrios especiales.
Fluoruros/HF	Presentes como impureza menor en algunas materias primas. Se agrega como materia prima en la producción de frita de esmalte para proporcionar determinadas propiedades al producto acabado. Se agrega como materia prima en la industria de la fibra de vidrio de filamentos continuos, y en algunas mezclas de vidrio para mejorar la fusión, o para producir algunas propiedades en el vidrio, como la opalescencia. Cuando se agregan fluoruros a la mezcla, normalmente en forma de espato flúor, las emisiones incontroladas pueden ser muy elevadas.
Metales Pesados (Ej. V, Ni, Cr, Se, Pb, Co, Sb, As, Cd)	Presentes como impurezas menores en algunas materias primas, vidrio recuperado de consumo y combustibles. Se utilizan en fundentes y agentes colorantes en el sector de fritas (predominantemente plomo y cadmio). Se utiliza en algunas formulaciones de vidrio especial (Ej. vidrio al plomo y algunos vidrios coloreados). El selenio se utiliza como colorante (vidrio al bronce), o como agente decolorante en algunos vidrios incoloros.
Dióxido de Carbono	Producto de combustión. Emitido tras la descomposición de los carbonatos presentes en las materias primas de mezcla (Ej. carbonato sódico, caliza).
Monóxido de Carbono	Producto de combustión incompleta, particularmente en cubilotes.
Sulfuro de Hidrógeno	Se forma a partir del azufre de las materias primas o de los combustibles en cubilotes, debido a las condiciones reductoras que se dan en algunas partes del horno.

Resumen de emisiones a la atmósfera derivadas de actividades de fusión

Las emisiones de las actividades de acabado pueden variar enormemente entre los distintos sectores y se discuten en las secciones específicas de cada sector. Aunque hay similitudes en las técnicas de fusión utilizadas en muchos sectores, las actividades de acabado tienden a ser específicas. Las emisiones a la atmósfera pueden provenir de: aplicación de recubrimientos y/o secado; procesos secundarios (Ej. corte, pulido, etc.); y algunas operaciones de conformación de productos (Ej. lana mineral y fibra cerámica).

En general, las emisiones al medio acuático son relativamente bajas y hay pocos aspectos importantes que sean específicos de la industria del vidrio. No obstante, hay actividades realizadas en algunos sectores que requieren ulterior consideración y que se discuten en las secciones específicas de cada sector, particularmente el vidrio doméstico, el vidrio especial y la fibra de vidrio de filamentos continuos.

Una característica de la mayoría de los sectores es que la inmensa mayoría de los residuos de vidrio generados internamente se recicla de nuevo al horno. Las principales excepciones a esto son el sector de filamentos continuos, el sector de fibras cerámicas y los productores de productos muy sensibles a la calidad en los sectores de vidrio especial y vidrio doméstico. Los sectores de lana mineral y fritas muestran una gran variación en la cantidad de residuos reciclados al horno, que van desde nada hasta el 100% para algunas plantas de lana de roca.

5. TÉCNICAS A CONSIDERAR EN LA DETERMINACIÓN DE LAS MTD

Muchos de los sectores de la industria del vidrio utilizan grandes hornos en continuo con períodos de vida de hasta doce años. Estos hornos suponen una gran inversión de capital, y el funcionamiento continuo del horno y la reconstrucción periódica ofrecen un ciclo de inversión natural en el proceso. Los cambios importantes en la tecnología de fusión se realizan de forma más económica si coinciden con reconstrucciones del horno, y esto puede también ser cierto para las medidas complejas de eliminación secundaria. No obstante, durante las campañas de operación del horno es posible realizar muchas mejoras en el funcionamiento del horno, incluida la instalación de técnicas secundarias.

Este resumen describe brevemente las principales técnicas para controlar cada sustancia emitida por las actividades de fusión y por algunas de las operaciones de acabado. Se concentra predominantemente en las emisiones a la atmósfera, ya que éstas son por lo general las emisiones más significativas de los procesos del vidrio. El Capítulo 4 ofrece descripciones detalladas de cada técnica y explica los niveles de emisiones alcanzados, la aplicabilidad de la técnica, aspectos económicos y otras consideraciones asociadas.

Partículas

Entre las técnicas para controlar las emisiones de partículas se incluyen medidas secundarias, por lo general precipitadores electrostáticos y filtros de mangas, así como medidas primarias.

El precipitador electrostático (PE) consiste en una serie de electrodos de descarga de alto voltaje y los correspondientes electrodos colectores. Las partículas se cargan y son posteriormente separadas de la corriente de gas por efecto del campo eléctrico. Los PE son muy eficaces para recoger polvo en el rango de 0,1 µm a 10 µm, y la eficacia de recogida global puede ser del 95 - 99 %. El rendimiento real varía, y depende principalmente de las características del gas residual y del diseño del PE. En principio, esta técnica es aplicable a todas las instalaciones nuevas y existentes en todos los sectores (excepto en los cubilotes para lana de roca, debido al riesgo de explosión). Los costes pueden ser superiores para las plantas existentes, particularmente cuando hay restricciones de espacio.

En la mayoría de aplicaciones, un PE de dos o tres etapas moderno y bien diseñado cabe esperar que consiga unos niveles de 20 mg/Nm³. Si se utilizan diseños de alta eficacia, o si se dan condiciones favorables, a menudo es posible obtener niveles de emisión más bajos. Los costes varían enormemente, según el rendimiento requerido y el volumen de gas residual. Los costes de inversión (incluido el lavado de gases ácidos) son generalmente del orden de 0,5 a 2,75 millones de euros, con costes operativos de 0,03 a 0,2 millones de euros anuales.

Los sistemas de filtro de mangas utilizan una membrana de tejido que es permeable al gas pero que retiene el polvo. El polvo se deposita sobre el tejido y dentro del mismo, y a medida que se deposita una capa en la superficie se convierte en el medio dominante del filtro. La dirección del flujo de gas puede ser desde el interior de la bolsa hacia el exterior, o desde el exterior al interior. Los filtros de tejido son muy eficaces y cabe esperar una eficacia de recogida del 95 – 99%. Pueden conseguirse emisiones de partículas entre 0,1 mg/Nm³ y 5 mg/Nm³, y niveles consistentemente por debajo de 10 mg/Nm³ en la mayoría de aplicaciones. La capacidad para conseguir niveles tan bajos puede ser importante si el polvo contiene niveles significativos de metales y deben obtenerse emisiones de metales bajas.

En principio, los filtros de mangas son aplicables a todas las instalaciones nuevas y existentes en todos los sectores. No obstante, debido a la posibilidad de que se obstruyan ciertas circunstancias, no son la opción idónea en todas las aplicaciones. En la mayoría de los casos existen soluciones técnicas a estas dificultades, pero puede haber un coste asociado. Los costes de inversión y de explotación son globalmente comparables con los PE.

Las técnicas de control primarias se basan principalmente en cambios en las materias primas y en modificaciones del horno y la combustión. En la mayoría de aplicaciones, las técnicas primarias no pueden alcanzar niveles de emisiones comparables a los de los filtros de mangas y PE.

Óxidos de Nitrógeno (NOx)

Las técnicas más apropiadas para controlar las emisiones de NOx son generalmente: emisiones primarias, fusión con oxicombustión, reducción química mediante combustible, reducción catalítica selectiva y reducción no catalítica selectiva.

Las medidas primarias pueden dividirse en dos tipos: modificaciones “convencionales” de la combustión y luego diseños especiales de hornos o diseños de combustión optimizada. La oxicombustión es también una técnica primaria, pero se trata por separado debido a su naturaleza específica. Las modificaciones de la combustión convencional se basan normalmente en: reducción de la relación aire/combustible, reducción de la temperatura de precalentamiento, combustión por etapas y quemadores de bajo nivel de NOx, o una combinación de estas técnicas. Los costes de inversión son por lo general bastante bajos, y los costes operativos son a menudo reducidos debido a la reducción del consumo de combustible y a la mejora de la combustión. Se han realizado muchos progresos en este campo, pero las reducciones de emisiones obtenibles dependen claramente del punto inicial. No son infrecuentes reducciones de NOx del 40 – 60% y en algunas aplicaciones se han conseguido niveles de emisiones inferiores a 650 – 1.100 mg/Nm³.

Se han desarrollado diseños especiales de hornos que reducen las emisiones de NOx, como por ejemplo el horno de fusión bajo en NOx. Estos diseños han tenido mucho éxito, pero hay ciertas restricciones de proceso que limitan su aplicabilidad. El proceso FENIX es un sistema de optimización de la combustión basado en medidas primarias, adaptado a un horno específico. Se han reportado resultados de 510 mg/Nm³ y alrededor de 1,1 Kg./tonelada de material fundido, pero el número de ejemplos es limitado en el momento presente.

La oxicombustión comporta la sustitución del aire de combustión por oxígeno. La eliminación de la mayor parte del nitrógeno de la atmósfera de combustión reduce el volumen de los gases residuales en alrededor de dos tercios. Por consiguiente, es posible obtener ahorros energéticos, dado que no es necesario calentar nitrógeno atmosférico a la temperatura de las llamas. La formación de NOx térmico se reduce enormemente, dado que el único nitrógeno presente en la atmósfera de combustión es el nitrógeno residual en el oxígeno / combustible, nitrógeno de la descomposición de nitratos, y el del aire parásito que pueda existir.

El principio de la oxicombustión está bien establecido y en principio puede considerarse como aplicable a la industria en su conjunto. No obstante, esta técnica es todavía considerada por algunos sectores (particularmente el vidrio plano y el vidrio doméstico) como una técnica en desarrollo con un riesgo económico potencialmente elevado. Se está realizando un considerable trabajo de desarrollo, y la técnica va siendo más ampliamente aceptada a medida que aumenta el número de plantas. Los aspectos que rodean esta técnica son muy complejos y se discuten en detalle en el Capítulo 4. La competitividad económica de la técnica depende en gran medida del grado de ahorro energético (y los costes relativos de las técnicas de eliminación alternativas) en comparación con el coste del oxígeno. La viabilidad económica y técnica depende fuertemente de asuntos específicos del centro de producción

La reducción química mediante combustible describe las técnicas en las que se agrega combustible a la corriente de gas residual para reducir químicamente el NOx a N₂ mediante una serie de reacciones. El combustible no se quema, sino que piroliza para formar radicales que reaccionan con los componentes del gas residual. Las dos técnicas principales que se han desarrollado para uso en la industria del vidrio son el proceso 3R y el proceso de Recombustión. Estas dos técnicas están actualmente restringidas a hornos regenerativos. El proceso 3R ha sido desarrollado plenamente para su aplicación en la industria, y el proceso de Recombustión se ha utilizado a escala de planta de producción, mostrando resultados prometedores. El proceso 3R puede conseguir niveles de emisiones de menos de 500 mg/Nm³ correspondientes a un aumento en el uso de combustible del 6 – 10%. Se espera que el proceso de Recombustión consiga niveles de emisiones comparables una vez desarrollado. El mayor consumo energético de ambas técnicas puede reducirse grandemente mediante el uso de sistemas de recuperación de energía, y combinando las técnicas con medidas primarias.

La reducción catalítica selectiva (SCR) comporta la reacción del NOx con amoniaco en un lecho catalítico, generalmente a unos 400 °C. La mayoría de aplicaciones en la industria del vidrio requieren un sistema de 3 etapas que incluye eliminación de polvo y lavado de gases ácidos. Los sistemas están normalmente diseñados para conseguir reducciones del 75 - 95 %, y en general pueden alcanzarse niveles inferiores a 500 mg/Nm³. El coste de la SCR depende principalmente del volumen de gas residual y de la reducción deseada de NOx. En general, los costes de inversión (incluidos PE y lavadores) son del orden de 1 a 4,5 millones de euros, con costes operativos de 0,075 a 0,5 millones de euros anuales. En principio, la SCR puede aplicarse a la mayoría de procesos de la industria del vidrio y a procesos tanto nuevos como existentes. No obstante, hay una serie de aspectos que pueden limitar la aplicabilidad de la técnica en ciertos casos. Por ejemplo, la técnica no ha sido probada para hornos de vidrio con combustión de fuel-oil pesado, ni para lana de vidrio o fibra de vidrio de filamentos continuos.

La reducción no catalítica selectiva (SNCR) utiliza el mismo principio que la SCR, pero las reacciones tienen lugar a temperatura más elevada (800 – 1100 °C) sin necesidad de un catalizador. La SNCR no requiere eliminación de polvo o lavado de gases ácidos. Generalmente se consiguen eficacias de reducción del 30 - 70%, el factor crítico es la disponibilidad de suficiente amoniaco en el margen de temperatura correcto. Los costes de inversión son del orden de 0,2 a 1,35 millones de euros, y los costes operativos se sitúan entre 23.000 y 225.000 euros anuales, según el tamaño del horno. En principio, la técnica es aplicable a todos los procesos de vidrio, incluidas las plantas nuevas y existentes. La principal limitación de la aplicación de la SNCR es si el reactivo puede introducirse en un punto en el sistema de gas residual en el que la temperatura correcta pueda mantenerse durante un tiempo de reacción adecuado. Esto es de particular importancia en las plantas existentes y para hornos regenerativos.

Oxídos de Azufre (SOx)

Las principales técnicas para controlar las emisiones de SOx son la selección del combustible, la formulación de las mezclas vitrificables y el lavado de gases ácidos.

En los procesos con combustión de fuel-oil, la principal fuente de SOx es la oxidación del azufre del combustible. La cantidad de SOx derivada de las materias primas de la mezcla varía según el tipo de vidrio, pero en general, cuando se quema fuel-oil, las emisiones de SOx del fuel-oil superan las de las materias primas de la mezcla. La forma más evidente de reducir las emisiones de SOx es reducir el contenido de azufre del combustible. El fuel-oil se halla disponible con distintos contenidos de azufre (<1 %, <2 %, <3 % y >3 %), y el gas natural está esencialmente exento de azufre. La conversión a un combustible de menor contenido de azufre no tiene generalmente la consecuencia de un aumento de costes, excepto el mayor coste del combustible. Los precios de los distintos combustibles varían sustancialmente con el tiempo y entre los Estados Miembros, pero en general los combustibles con menor contenido de azufre son más caros. Como se explica en el Capítulo 5, los aspectos financieros y políticos asociados con los precios y la disponibilidad de los combustibles son tales que la selección de combustible se considera fuera del ámbito de este documento. No obstante, si se quema gas natural, las emisiones del SOx serán normalmente menores, y si se quema fuel-oil, un nivel de azufre del 1% o menos se considera como MTD. La combustión de combustibles de alto contenido en azufre puede también considerarse MTD si se utiliza un sistema de eliminación para obtener niveles de emisiones equivalentes.

En la fabricación de vidrio convencional, los sulfatos son la principal fuente de emisiones de SOx de las materias primas de mezcla. Los sulfatos son los agentes de afino más ampliamente usados, y son también importantes agentes oxidantes. En la mayoría de hornos de vidrio modernos, los niveles de sulfatos en la mezcla se han reducido a los mínimos niveles practicables, que varían según el tipo de vidrio. Los aspectos relacionados con la reducción de sulfatos en la mezcla se discuten en la Sección 4.4.1.1, y los aspectos relativos al reciclaje de polvo de los filtros de mangas o de los precipitadores electrostáticos (PE) se discuten en la Sección 4.4.3.3.

En la producción de lana de roca son importantes fuentes de emisión de SO₂ (además del coque) el uso de escoria de alto horno y de briquetas aglomeradas con cemento en la mezcla. La disponibilidad de

coque y escoria con bajo contenido en azufre está restringida por un suministro muy limitado dentro de distancias de transporte económicas. La escoria puede generalmente eliminarse de la mayoría de mezclas, con la excepción de la producción de cantidades limitadas de fibra blanca para aplicaciones específicas. El uso de briquetas de residuos aglomeradas con cemento supone un equilibrio entre la minimización de residuos y la reducción de emisiones de SOx, que a menudo dependerá de prioridades específicas y debe considerarse en asociación con el uso de lavado de gases ácidos. Este aspecto se discute ampliamente en los capítulos 4 y 5 del documento principal.

Los principios operativos del lavado seco y semiseco son los mismos. El material reactivo (absorbente) se introduce y dispersa en la corriente de gas residual. Este material reacciona con las especies de SOx formando un sólido, que debe eliminarse de la corriente de gas residual mediante un precipitador electrostático o sistema de filtro de mangas. Los absorbentes escogidos para eliminar SOx son también eficaces para eliminar otros gases ácidos. En el proceso seco, el absorbente es un polvo seco (normalmente Ca(OH)₂, NaHCO₃, o Na₂(CO)₃). En el proceso semiseco, el absorbente (normalmente Na₂CO₃, CaO o Ca(OH)₂) se agrega como suspensión o solución, y la evaporación de agua enfriá la corriente de gas. Las reducciones conseguidas con las técnicas dependen de una serie de factores, como la temperatura del gas residual, la cantidad y tipo de absorbente agregado (o más precisamente la relación molar entre reactante y contaminantes) y la dispersión del absorbente. La sección 4.4.3.3 detalla las eficacias obtenidas con distintos absorbentes y procesos.

El reciclaje completo del polvo de filtro, incluido el residuo sulfatado, se considera con frecuencia una opción medioambiental y económica razonable, cuando es técnicamente posible. La reducción global de las emisiones de SOx está limitada (por consideraciones de balance de masa) a la reducción en origen obtenida sustituyendo el sulfato de las materias primas por polvo de filtro (Evidentemente esto es adicional a otras medidas primarias apropiadas para reducir la entrada global de azufre). Por consiguiente, para reducir las emisiones de gases ácidos, puede ser necesario considerar una ruta de desecho externa para una parte del material recogido. La determinación de qué es lo que representa la mejor protección del medio ambiente en conjunto puede muchas veces ser específica del centro de producción y puede suponer el equilibrio de las prioridades potencialmente conflictivas de minimización de residuos y reducción de emisiones de SOx. En tal caso será esencial realizar un balance de azufre del proceso para determinar los niveles de emisiones correspondientes a con las MTD.

Con el reciclaje de polvo de filtro en circuito cerrado, los niveles de emisión de SOx observados hoy son generalmente del orden de 200 - 800 mg/Nm³ para combustión de gas natural, y de 800 – 1.600 mg/Nm³ con fuel-oil con un 1 % de S. La mayoría de sistemas de lavado de SOx instalados operan con lavado seco con cal a una temperatura de alrededor de 400 °C, que es la temperatura del gas residual obtenida en un horno de tipo regenerativo eficiente. A estas temperaturas, puede obtenerse una reducción de SOx de alrededor del 50%. Puede obtenerse un índice mejorado de reducción de SOx a temperaturas de alrededor de 200 °C y con atmósfera húmeda, pero esto comporta consideraciones adicionales.

El lavado de SOx es un campo extremadamente complejo que generó gran cantidad de discusión dentro del grupo de trabajo técnico. Por consiguiente, es esencial considerar en su totalidad la discusión y la explicación presentadas en los capítulos 4 y 5.

Fluoruros (HF) y Cloruros (HCl)

Las emisiones de HF y HCl se derivan por lo general de la volatilización de fluoruros y cloruros en las materias primas de mezcla, presentes como impurezas o agregados intencionadamente para proporcionar al vidrio características específicas de producto o proceso. Las técnicas principales para la reducción de estas emisiones son la modificación de la mezcla o el lavado. Si hay haluros presentes como impurezas, las emisiones pueden por lo general controlarse mediante la selección de las materias primas, aunque el lavado se utiliza a menudo cuando la selección de materias primas no es suficiente o cuando se utiliza el lavado para controlar otras sustancias. Cuando se utilizan haluros para conferir características específicas, existen dos enfoques básicos, lavado y reformulación de la mezcla, para conseguir las mismas carac-

terísticas por otros medios. Se han obtenido éxitos particulares con la reformulación en fibra de vidrio de filamentos continuos.

Emisiones de Otras Actividades

Las emisiones de los procesos de acabado son específicas de cada sector y se describen con cierto detalle en la Sección 4.5 del documento principal. Con la excepción del sector de lana mineral, las emisiones son mucho menores que las de las actividades de fusión. Las técnicas de eliminación se basan generalmente en técnicas convencionales de recogida de polvo y de lavado húmedo con una cierta oxidación térmica.

En los procesos de lana mineral existe el potencial de emisiones sustanciales de la aplicación y polymerización de sistemas aglomerantes a base de resinas orgánicas. Las técnicas para controlar estas emisiones se discuten en detalle en la sección 4.5.6 del documento principal.

Emisiones al Agua

En general, las emisiones al medio acuático son relativamente bajas y hay pocos aspectos importantes que sean específicos de la industria del vidrio. El agua se utiliza principalmente para limpiar y refrigerar, y puede ser fácilmente reciclada o tratada mediante técnicas estándar. Pueden surgir aspectos específicos de contaminación orgánica en los procesos de lana mineral y de fibra de vidrio de filamentos continuos. También hay que tener en cuenta el tema de los metales pesados (particularmente plomo) en los procesos de vidrio especial, fritas y vidrio doméstico. La tabla inferior identifica las principales técnicas posibles para controlar las emisiones al agua.

Tratamiento Físico / Químico
• Cribado
• Derivación Superficial
• Sedimentación
• Centrifugado
• Filtración
• Neutralización
• Aireación
• Precipitación
• Coagulación y Floculación

Tratamiento Biológico
• Fangos activos
• Biofiltración

Lista de posibles técnicas de tratamiento de aguas residuales para uso en la Industria del Vidrio

Residuos Sólidos

Una característica de la industria del vidrio es que la mayoría de las actividades producen niveles relativamente bajos de residuos sólidos. La mayoría de procesos no tienen caudales significativos de subproductos inherentes. Los principales residuos de los procesos son: materias primas no utilizadas, vidrio residual que no se ha convertido en producto y producto de desecho. Otros residuos sólidos son material refractario residual y polvo recogido en el equipo de eliminación o en los gases de combustión. Los residuos no fibrosos se reciclan directamente al proceso, y se están desarrollando técnicas para reciclar otros residuos. El grado de reciclaje de residuos va aumentando a medida que se desarrollan incentivos económicos, en particular los mayores costes de desecho. Los principales residuos de proceso producidos en la industria del vidrio y las técnicas empleadas para su control se discuten en la Sección 4.7 del documento principal.

Energía

La fabricación de vidrio es un proceso muy intensivo desde el punto de vista energético, y la elección de fuente de energía, técnica de calentamiento y método de recuperación de calor es crucial en el diseño del horno y en la economía del proceso. Las mismas opciones son también algunos de los factores más importantes que afectan el comportamiento medioambiental y la eficacia energética de la operación de

fusión. En general, la energía necesaria para fundir vidrio representa más del 75% de los requisitos totales de energía de la fabricación de vidrio. El coste de la energía de fusión es uno de los principales costes operativos de las instalaciones de fabricación de vidrio, por lo que hay un importante incentivo para los fabricantes en la reducción del consumo energético.

Las principales técnicas para reducir el consumo energético se detallan a continuación y se discuten en detalle en el documento principal:

- ✓ Técnica de fusión y diseño del horno (Ej. regeneradores, recuperadores, fusión eléctrica, oxicombustión, y refuerzo eléctrico).
- ✓ Control de combustión y elección de combustible (Ej. quemadores de bajo nivel de NO_x, combustión estequiométrica, combustión de fuel-oil / gas).
- ✓ Uso de vidrio recuperado
- ✓ Calderas de recuperación
- ✓ Precalentamiento del vidrio recuperado/mezcla

6. RESUMEN DE LAS CONCLUSIONES SOBRE MTD

El Capítulo 5 presenta las conclusiones sobre las mejores técnicas disponibles para conseguir la prevención y control integrado de la contaminación en la industria del vidrio. El capítulo contiene una introducción, una sección general y luego conclusiones específicas para el sector. Se pretende que las “MTD generales” del Capítulo 5 puedan usarse para juzgar el comportamiento actual de una instalación existente o para juzgar una propuesta de nueva instalación, y por lo tanto servir de asistencia en la determinación de la “MTD” apropiada, sobre la base de las condiciones para dicha instalación. Las cifras presentes **no son** valores límite de emisión, y no deben entenderse como tales. Los valores límite de emisión apropiados para cualquier caso específico deberán determinarse teniendo en consideración los objetivos de la Directiva IPPC y las consideraciones locales

El Capítulo 5 se escribió tras una fuerte controversia y nuevas redacciones dentro del Grupo de Trabajo Técnico. El contexto y las sutilezas de las conclusiones son muy importantes, y es muy difícil resumir el capítulo sin comprometer estos aspectos y el esfuerzo y discusión que se requirió para llegar a la posición actual. Este resumen detalla las conclusiones principales del Capítulo 5, pero es esencial consultar el documento completo y en particular el texto completo del Capítulo 5 para su plena comprensión.

Este resumen detalla algunos de aspectos que afectan a toda la industria, y luego resume las conclusiones generales principales adoptando un enfoque predominantemente basado en las sustancias. Una importante conclusión que se extrajo de este trabajo es que la industria del vidrio es tan diversa que a menudo es inapropiado especificar técnicas particulares. El enfoque general adoptado en el Capítulo 5 es identificar niveles de comportamiento indicativos de las mejores técnicas disponibles, aunque reconociendo al mismo tiempo que el mejor modo de alcanzar estos niveles de actuación puede diferir de un proceso a otro.

Generalidades

Una característica importante de muchas instalaciones en la industria del vidrio es la reconstrucción periódica de los hornos, aunque el grado de reconstrucción puede variar. Pueden existir ventajas técnicas y económicas para coordinar la implementación de ciertas técnicas hasta una reconstrucción, pero éste no es siempre el caso. El ciclo de reconstrucción también significa que la edad de un horno es importante para determinar las acciones apropiadas en términos de las MTD globales.

Las condiciones de referencia para el Capítulo 5 son:

-
- ✓ Para gases de combustión: secos, temperatura 0°C (273K), presión 101,3 kPa, 8 % oxígeno en volumen (hornos de fusión en continuo), 13 % oxígeno en volumen (hornos de fusión en discontinuo). Para sistemas de oxicombustión, la expresión de las emisiones corregidas al 8% de oxígeno es de escaso valor, y las emisiones de estos sistemas deben discutirse en términos de masa.
 - ✓ Para otros gases (incluidas las emisiones de los hornos de polimerización y secado sin incineración del gas de escape): temperatura 0°C (273 K), presión 101,3 kPa sin corrección de oxígeno o concentración de vapor de agua.

En el documento principal, los niveles de emisiones asociados con las MTD se presentan como rangos de concentración de emisión (mg/Nm^3) y masa emitida ($\text{kg}/\text{tonelada de vidrio fundido}$), para permitir la comparación entre las técnicas de los hornos y para proporcionar una indicación del impacto medioambiental relativo. Para hornos de combustibles fósiles, la relación entre masa y concentración depende predominantemente del consumo específico de energía para la fusión, aunque éste varía considerablemente según una amplia gama de factores entre los que se incluyen la técnica de fusión, el tamaño del horno y el tipo de vidrio. Para una industria tan diversa, es difícil establecer una relación directa entre las cifras de concentraciones y la masa emitida sin presentar rangos que sean muy amplios y disminuyan el valor de las conclusiones numéricas. Por consiguiente, el enfoque adoptado es dar las cifras de concentraciones como la base de las MTD y utilizar factores de conversión indicativos basados en hornos modernos y eficaces desde el punto de vista energético, a fin de determinar cifras de masas emitidas que “generalmente corresponden a” estos niveles de concentración.

A los efectos de este resumen ejecutivo, los niveles de emisiones asociados con las MTD se indican sólo en forma de concentración. La excepción a esta norma es cuando se discuten técnicas como la oxicombustión, en las que la masa emitida es la forma más significativa de describir el nivel de emisiones. Para la masa por tonelada de vidrio fundido, debe hacerse referencia a la discusión sobre factores de conversión de la Sección 1.41 y a las secciones específicas de cada sector en el Capítulo 5.

Partículas / Polvo

La conclusión relativa a las emisiones de polvo era en general comparable para todos los sectores y se resume en el párrafo siguiente. Hubo dos pequeñas excepciones a esta conclusión. Para fibra cerámica, el nivel de emisión asociado con las MTD se consideró que era inferior a $10 \text{ mg}/\text{Nm}^3$ debido a la naturaleza de las materias en forma de partículas. Para los procesos de fritas, la conclusión general fue la abajo indicada, pero se reconoció que para algunas instalaciones sería necesario un cierto grado de desarrollo para alcanzar estos niveles.

En general, las MTD para controlar las emisiones de polvo de los hornos en la industria del vidrio se considera que es el uso de un sistema de precipitadores electrostáticos o de filtros de manga, que actúen en los lugares apropiados, en conjunción con un sistema seco o semiseco de lavado de gases ácidos. El nivel de emisiones de las MTD asociados con estas técnicas es de $5 - 30 \text{ mg}/\text{Nm}^3$, que en general equivale a menos de $0,1 \text{ kg}/\text{tonelada de vidrio fundido}$. Los valores de la parte inferior del rango son los que normalmente cabría esperar para sistemas de filtros de manga. Estas cifras están basadas en un periodo de promedio típico no inferior a 30 minutos ni superior a 24 horas. En algunos casos, la aplicación de las MTD para las emisiones de metales puede producir niveles de emisión más bajo para polvo.

Algunas opiniones dentro del Grupo de Trabajo Técnico discrepan sobre si los beneficios medioambientales de la eliminación secundaria de polvo justificaban los mayores costes en todos los casos. No obstante, la conclusión general es que la eliminación secundaria de polvo representa la MTD para la mayoría de hornos de vidrio, a menos que puedan obtenerse emisiones equivalentes con medidas primarias. Los pros y contras de las técnicas primarias y secundarias se discuten ampliamente en la Sección 4.4.1.7 y 5.2.2.

Óxidos de Nitrógeno

Esta sustancia ha resultado ser una de las más difíciles a la hora de alcanzar conclusiones firme sobre MTD. En particular, es difícil atribuir niveles de emisión generales aplicables a más de un sector. Por consiguiente, es esencial que las cifras indicadas en esta sección se vean sólo como un resumen indicativo de las conclusiones presentadas en el Capítulo 5. Basar cualquier consideración sobre las condiciones que permitan las MTD en la información de este resumen sin referencia al documento principal sería tomar las cifras totalmente fuera de contexto. Esto podría llevar al uso de puntos de referencia innecesariamente estrictos o tolerantes para comparación.

Para óxidos de nitrógeno, la selección de técnicas que representa las MTD dependerá mucho de los aspectos específicos del centro de producción, en particular de la técnica de fusión empleada y de la edad del horno. Ciertas técnicas pueden conseguir distintos resultados en distintas aplicaciones y puede producir distintos costes según las condiciones específicas del centro de producción.

Para los procesos de vidrio para envases, vidrio plano, vidrio especial (incluido vidrio soluble), lana mineral y fritas, se considera que el nivel de emisiones de óxidos nitrógeno (expresado como NO₂) asociado con las técnicas que normalmente constituyen las MTD es de 500 - 700 mg/Nm³. Aunque el nivel de emisiones asociado con las MTD es generalmente el mismo, las técnicas que pueden usarse para alcanzar estos niveles, sus costes asociados, y la dificultad relativa para su aplicación, pueden variar entre los distintos sectores.

Existen diversas situaciones en las que son necesarias consideraciones ulteriores y los niveles de emisiones arriba indicados pueden no ser apropiados. Por ejemplo, cuando se necesitan nitratos, cuando se utilizan determinadas materias primas recicladas o cuando un horno se aproxima al final de su vida útil. Estas consideraciones son muy importantes y se discuten en las secciones específicas de cada sector en el Capítulo 5.

En el momento presente, el sector de filamentos continuos está pasando por un periodo de transición en el control de NOx, lo que hace muy difícil extraer conclusiones firmes relativas a MTD. La técnica más prometedora parece ser la fusión con oxicombustión, aunque se han conseguido algunos buenos resultados con medidas primarias y no hay obstáculos fundamentales al uso de la SNCR. En general en este sector, la MTD para óxidos de nitrógeno (expresados como NO₂) se considera que debe ser la fusión con oxicombustión, y el nivel de emisiones asociado con las MTD se considera que es de 0,5 – 1,5 kg/tonelada de vidrio fundido. Esta afirmación no es una conclusión firme, sino más bien una estimación equilibrada sobre la base de la información disponible en el momento presente. Se reconoce que la técnica lleva todavía un elemento de riesgo económico, pero se espera que sea aceptada más ampliamente como MTD a medio plazo. Cuando son practicables otras técnicas, un nivel de emisiones de MTD comparable para hornos de combustión con aire se considera que es 500 - 700 mg/Nm³.

De modo similar, es difícil extraer conclusiones firmes para los niveles de NOx en el sector del vidrio doméstico. Hay algunos aspectos específicos del sector que afectan las opciones para el control de NOx. Algunos de ellos pueden ilustrarse mediante una comparación con vidrio para envases, es decir, restricciones de calidad potencialmente mayores; volúmenes de producción más bajos; menor tamaño medio de los hornos; restricciones al vidrio recuperado; temperaturas más elevadas y tiempos de estancia más largos. Todos estos factores llevan a un mayor consumo específico de energía y aumentan el potencial de formación de NOx. En general, cuando la fusión eléctrica (al 100% o predominantemente eléctrica) es viable económicamente, y en particular para la producción de vidrio al plomo y vidrio opalino, la técnica se considera como MTD. En este caso, el nivel de emisiones asociado con las MTD será generalmente de 0,2 – 1,0 kg/tonelada de vidrio fundido.

Cuando la fusión eléctrica no es viable económicamente, pueden usarse diversas otras técnicas. El sector de vidrio doméstico utiliza una amplia gama de tipos de hornos, y la técnica más apropiada es por lo general específica de cada instalación. Está previsto que dado el tiempo necesario para el desarrollo y

la implementación de las técnicas, el nivel de emisiones de óxidos de nitrógeno (expresado como NO₂) asociado con las MTD será de 500 - 700 mg/Nm³ (o, para la fusión con oxicombustible, 0,5 – 1,5 kg/tonelada de vidrio fundido). Esto se basa en el uso de medidas primarias (o combinaciones de las mismas), oxicombustión, SNCR, SCR o 3R/Recombustión (hornos regenerativos únicamente).

Los cubilotes para lana de roca no dan origen por lo general a emisiones sustanciales de NOx, y pueden conseguirse emisiones inferiores a 0,5 kg/tonelada de material fundido sin controles específicos. Cuando se utilizan hornos de cuba, el nivel de emisión asociado con las MTD se considera equivalente al de la producción de lana de vidrio. La fibra cerámica se produce exclusivamente con hornos eléctricos, y las emisiones de NOx están por lo general significativamente por debajo de 0,5 kg/tonelada de material fundido.

Óxidos de Azufre

La determinación de los niveles de emisiones asociados con las MTD para cada uno de los sectores es un tema complejo con muchas consideraciones interrelacionadas y a veces contrapuestas. Estos aspectos se explican con detalle en los capítulos 5 y 4, y la información aquí presentada es sólo un resumen indicativo.

Una influencia básica en la elección del combustible es el nivel de azufre. Por consiguiente, las circunstancias combustión con fuel-oil y con gas se consideran por separado. Además, determinadas formulaciones, particularmente los vidrios s, requieren el uso de sulfatos en la mezcla, y claramente estas formulaciones tenderán a presentar mayores emisiones no eliminadas de SO₂.

Se prevé que, en la mayoría de los casos, las MTD para emisiones de polvo comportarán el uso de un sistema de eliminación de polvo, que a menudo incluirá lavado de gases ácidos, y esto se tiene en cuenta en los niveles de emisiones propuestos asociados con las MTD en el Capítulo 5. Los residuos sulfatados producidos pueden generalmente ser reciclados con las materias primas en el horno, para evitar que se produzca un volumen de residuos sólidos. No obstante, hay un límite en el grado en que el vidrio puede actuar como sumidero del azufre, y el sistema puede alcanzar rápidamente un equilibrio en el que se reemite una cantidad significativa del azufre reciclado. Por lo tanto, con el pleno reciclaje del polvo, el efecto de desulfuración del lavador puede estar limitado por la capacidad del azufre para absorber azufre.

Con el fin de reducir ulteriormente las emisiones de SO₂ puede ser necesario considerar una vía de desecho externo o, si es practicable, reducir los niveles de azufre del combustible. Las opciones económicamente viables para reciclar el material fuera del centro son extremadamente limitadas, y la vía de desecho más probable es el vertedero, lo que produce un volumen de residuo sólido. El enfoque más apropiado puede variar de un proceso a otro, y por este motivo se presentan niveles de emisiones en los que la prioridad es la reducción de SO₂, y otros en los que la prioridad es la reducción de residuos. En la práctica existen muchos casos en los que puede conseguirse un menor nivel de emisiones con el pleno reciclaje del polvo.

La tabla siguiente resume los niveles de emisiones asociados con las MTD para cada sector y para distintas situaciones. Nuevamente, se trata sólo de un resumen indicativo, y debe hacerse referencia al Capítulo 5 para tener en consideración las complejidades involucradas.

Sector	Niveles de emisiones de MTD (mgSO ₂ /Nm ³)		Comentarios
	combustión a gas	combustión a fuel-oil	
Vidrio para envases con reducción de SO ₂ como prioridad	200 - 500	500 – 1.200	
Vidrio para envases con minimización de residuos como prioridad	< 800	< 1.500	Cuando el balance de materia no permite alcanzar las cifras superiores.
Vidrio plano con reducción de SO ₂ como prioridad	200 - 500	500 – 1.200	
Vidrio plano con minimización de residuos como prioridad	< 800	< 1.500	Cuando el balance de materia no permite alcanzar las cifras superiores.
Fibra de vidrio de filamentos continuos	< 200	500 – 1.000	Si hay sulfatos en la mezcla, la combustión a gas podría ser hasta 800. Para combustión a fuel-oil, el extremo superior del rango hace referencia al reciclaje de polvo.
Vidrio doméstico	200 - 500	500 – 1.300	Sí el nivel se sulfatos en la mezcla es bajo, <200 para combustión a gas. Las cifras del extremo superior de los rangos hacen referencia al reciclaje de polvo.
Vidrio Especial, incluido vidrio soluble	200 - 500	500 – 1.200	Las cifras del extremo superior de los rangos hacen referencia al reciclaje de polvo.
Lana de vidrio	generalmente <50	300 – 1.000	Generalmente vidrio bajo en sulfato.
Lana de roca (combustión de coque) con minimización de residuos y reciclaje como prioridad	(a) < 600 (b) < 1.100 (c) < 1.400		(a) Mezcla de roca (b) 45 % briquetas aglomeradas con cemento (c) Briquetas con cemento incluyendo polvo de filtro
Lana de roca (combustión de coque) con reducción de SO ₂ como prioridad	(a) < 200 (b) < 350 (c) < 420		(d) Mezcla de roca (e) 45 % briquetas aglomeradas con cemento (a) Briquetas con cemento incluyendo polvo de filtro
Fibra cerámica (fusión eléctrica)	< 0.5 kg/tonelada de material fundido		Hornos eléctricos sólo, la concentración será específica de cada caso.
Fritas	< 200	500 – 1.000	La combustión con fuel-oil es rara.

Resumen indicativo de los niveles de emisiones de azufre asociados con las MTD (expresados como SO₂)

Otras Emisiones de la Fusión

Cada una de las secciones de los sectores específicos del Capítulo 5 tiene una subsección para cubrir las emisiones de las operaciones de fusión distintas de polvo, NOx y SOx. Las más significativas de esta “otras emisiones” son generalmente cloruros (expresados como HCl), fluoruros (expresados como HF), y metales y sus compuestos. Ciertos metales se agrupan y se denominan del Grupo 1 o del Grupo 2. Los metales que caen fuera de estos grupos se especifican individualmente, debido a su mayor toxicidad, o se cubren sólo dentro de la categoría de polvo, ya que su baja toxicidad o justifica su consideración específica. Los dos Grupos se detallan en la tabla inferior.

Metales del Grupo 1 y sus compuestos	Metales del Grupo 2 y sus compuestos
Arsénico	Antimoni
Cobalto	Plomo
Níquel	Cromo III
Selenio	Cobre
Cromo VI	Manganeso
	Vanadio
	Estaño

Clasificaciones de los metales y sus compuestos

Las conclusiones sobre MTD para la mayoría de sectores en relación con estas sustancias fueron

generalmente equivalentes. La MTD para el control de estas emisiones se considera la selección de las materias primas para minimizar las emisiones, en combinación con el lavado de gases ácidos cuando proceda. El lavado de gases ácidos puede no ser siempre necesario, bien para proteger el equipo de eliminación, bien para alcanzar las cifras indicadas para SOx. En este caso, el lavado de gases ácidos se considera que constituye MTD si no pueden conseguirse los niveles abajo indicados mediante medidas primarias. Los niveles de emisiones asociados con las MTD para los contaminantes abajo indicados se consideran los siguientes:

- Cloruros (expresados como HCl) <30 mg/Nm³
- Fluoruros (expresados como HF) <5 mg/Nm³
- Metales (fase gaseosa + sólida) (Grupo 1 + Grupo 2) <5 mg/Nm³
- Metales (fase gaseosa + sólida) (Grupo 1) <1 mg/Nm³

En los sectores de fritas y vidrio especial, existen ciertos casos con emisiones potenciales de cadmio y talio. El nivel de emisiones asociado con las MTD para estos metales y sus compuestos es <0.2 mg/Nm³. Para la producción de fibra de vidrio de filamentos continuos, el nivel de emisión de fluoruros asociado con las MTD es de 5 - 15 mg/Nm³. El extremo inferior de este rango corresponde a las composiciones sin adición de fluoruros, mientras que el extremo superior corresponde a las composiciones con adición de fluoruros.

En el sector de lana de roca se indican asimismo los niveles de emisiones asociados con las MTD para monóxido y sulfuro de hidrógeno. Los mismos son <200 mg/Nm³ y < 5 mg/Nm³, respectivamente.

Procesos de Acabado

Los procesos de acabado varían en gran medida según el sector específico y las instalaciones involucradas, por lo que es necesario hacer referencia a las secciones específicas de los distintos sectores en el Capítulo 5. No obstante, con la excepción de la lana mineral, a continuación se indican algunos niveles de emisiones indicativos asociados con las MTD. No todas las sustancias aparecen en todas las instalaciones o sectores, y ciertas sustancias se discuten en algunas de las secciones específicas de cada sector, no cubriendose aquí por ser aplicables a un solo sector. No obstante estos aspectos, hay ciertos elementos comunes en los tipos de técnicas que pueden utilizarse en caso de ser necesaria eliminación secundaria.

- Cloruros (expresados como HCl) <30 mg/Nm³
- Fluoruros (expresados como HF) <5 mg/Nm³
- Partículas <20 mg/Nm³
- Metales (fase gaseosa y sólida) (Grupo 1 + Grupo 2) <5 mg/Nm³
- Metales (fase gaseosa y sólida) (Grupo 1) <1 mg/Nm³

Emisiones al Agua

Las emisiones acuosas de las actividades en la industria del vidrio son generalmente bajas y no son específicas de la industria. No obstante, una serie de actividades pueden dar lugar a emisiones acuosas significativas. Los niveles de emisiones abajo indicados se consideran por lo general apropiados para proteger el entorno acuático y son indicativos de los niveles de emisiones que se alcanzarán con las técnicas que generalmente se considera que representan las MTD. No representan necesariamente los niveles actualmente alcanzados por la industria, sino que se basan en el juicio experto del Grupo de Trabajo Técnico (TWG).

- Sólidos en suspensión <30 mg/l

○ Demanda Química de Oxígeno (Nota1)	100 - 130 mg/l
○ Amoníaco (Kjeldahl)	<10 mg/l
○ Sulfatos	<1.000 mg/l
○ Fluoruros	15 - 25 mg/l
○ Arsénico	<0,3 mg/l
○ Antimonio	<0,3 mg/l
○ Bario	<3,0 mg/l
○ Cadmio	<0,05 mg/l
○ Cromo (Total)	<0,5 mg/l
○ Cobre	<0,5 mg/l
○ Plomo (Nota 2)	<0,5 mg/l
○ Níquel	<0,5 mg/l
○ Estaño (Nota 3)	<0,5 mg/l
○ Zinc	<0,5 mg/l
○ Fenol	<1,0 mg/l
○ Ácido bórico	2 - 4 mg/l
○ pH	6,5 - 9
○ Aceite mineral	<20 mg/l

(Nota 1) – Para el sector de fibra de vidrio de filamentos continuos, esta cifra se considera que es 200 mg/l. En general, la demanda química de oxígeno es bastante baja, y el nivel real asociado con las MTD puede depender del agua receptora. Si el agua receptora es particularmente sensible, pueden requerirse niveles por debajo de esta cifra.

(Nota 2) – Para procesos de vidrio doméstico que utilizan cantidades considerables de compuestos de plomo, 1,0 mg/l se considera actualmente más apropiado. No hay obstáculos técnicos insalvables para conseguir 0,5 mg/l, y dado el tiempo necesario para el desarrollo e implementación de las técnicas apropiadas, esta cifra será alcanzable.

(Nota 3) – Para procesos de vidrio para envases que utilicen lavadores acuosos para el tratamiento de las emisiones de acabado, un nivel de emisión de <3 mg/l es más apropiado.

En determinadas circunstancias, la evacuación a una instalación de tratamiento de aguas residuales o a otra instalación de tratamiento externo puede también constituir una MTD. Cuando se proponga este enfoque, debe considerarse la adecuación de la instalación receptora.

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Este capítulo se divide en tres secciones: intercambio de información, conclusiones generales y recomendaciones para trabajos futuros. La primera sección detalla las escalas de tiempo y mecanismos para el ejercicio del intercambio de información. Se facilitó una gran cantidad de información por parte de la industria y los Estados Miembros, que por lo general era de gran calidad. La información disponible se

refinó y validó durante los procesos de consulta. Se recomienda la revisión de este documento en los próximos 4 a 5 años.

Las principales conclusiones generales son:

- ✓ Que el intercambio de información fue un éxito y que se alcanzó un alto grado de acuerdo tras la segunda reunión del grupo de trabajo técnico.
- ✓ La industria es extremadamente diversa y por lo general no es apropiado especificar una sola técnica como MTD en la mayoría de casos.
- ✓ Se ha avanzado mucho en años recientes para mejorar el comportamiento medioambiental de la industria. No obstante, se esperan ulteriores desarrollos / mejoras, particularmente con las técnicas primarias, pero también con la aplicación de técnicas secundarias que se han aplicado más comúnmente en otros sectores.

Las principales recomendaciones para trabajos futuros son:

- ✓ Sería interesante una evaluación más en profundidad (preferiblemente semicuantitativa) de los efectos sobre otros medios.
- ✓ Una consideración más detallada de los costes de las técnicas sería útil en la determinación de las MTD.
- ✓ En la revisión de la obra sería útil una evaluación más en profundidad de las técnicas para mejorar la eficacia energética, teniendo en cuenta información disponible más recientemente.
- ✓ En la revisión de la obra debería reevaluarse el progreso con métodos primarios de control de emisiones.
- ✓ En la revisión de la obra, deberían reevaluarse aquellas técnicas que actualmente tienen algunos aspectos no probados o controvertidos, para la industria del vidrio como conjunto o en ciertas aplicaciones. En particular, la eliminación del dióxido de azufre, la oxicombustión y la SCR.

PREFACIO

1. CATEGORÍA DEL PRESENTE DOCUMENTO

Salvo que se indique lo contrario, las referencias a “la Directiva” en el presente documento deberán entenderse referencias a la Directiva 96/61/CE del Consejo relativa a la Prevención y al Control Integrados de la Contaminación (IPPC). Este documento forma parte de una serie en la que se presentan los resultados del intercambio de información entre los Estados Miembros de la Unión Europea y los sectores afectados con respecto a las mejores técnicas disponibles (MTD), los trabajos de seguimiento de las mismas y su evolución. Ha sido publicado por la Comisión Europea con arreglo al apartado 2 del artículo 16 de la Directiva y, por lo tanto, debe tenerse en cuenta de conformidad con el anexo IV de la Directiva a la hora de determinar las “mejores técnicas disponibles”.

2. PRINCIPALES OBLIGACIONES LEGALES DE LA DIRECTIVA IPPC Y DEFINICIÓN DE MTD

A fin de ayudar al lector a comprender el contexto legal en el que se ha redactado el presente documento, se describen en este prefacio las disposiciones más importantes de la Directiva IPPC, incluida la definición del término “mejores técnicas disponibles” (MTD). Se trata de una descripción inevitablemente incompleta, de carácter exclusivamente informativo. No tiene valor legal y no modifica ni menoscaba en modo alguno las disposiciones de la Directiva.

La Directiva tiene por objeto la prevención y el control integrados de la contaminación a través de las actividades relacionadas en su anexo I, encaminadas a lograr un alto grado de protección del medio ambiente en su conjunto. Aunque el ámbito legal de la Directiva es exclusivamente la protección medioambiental, en su aplicación también deben tenerse en cuenta otros objetivos comunitarios, como garantizar la existencia de las condiciones necesarias para la competitividad de la industria comunitaria, contribuyendo con ello al desarrollo sostenible.

Más concretamente, en ella se establece un sistema de permisos para ciertas categorías de instalaciones industriales que exige que tanto sus titulares como las autoridades reguladoras realicen un análisis integrado y global del potencial de contaminación y consumo de la instalación. El objetivo global de un enfoque integrado de este tipo debe ser mejorar la gestión y el control de los procesos industriales, a fin de conseguir un alto grado de protección para el medio ambiente en su conjunto. Para ello es fundamental el principio general establecido en el artículo 3, por el que los titulares deben tomar todas las medidas adecuadas de prevención de la contaminación, en particular mediante la aplicación de las mejores técnicas disponibles que les permitan mejorar su comportamiento con respecto al medio ambiente.

En el apartado 11 del artículo 2 de la Directiva se define el término “mejores técnicas disponibles” como “la fase más eficaz y avanzada de desarrollo de las actividades y de sus modalidades de explotación, que demuestren la capacidad práctica de determinadas técnicas para constituir, en principio, la base de los valores límite de emisión destinados a evitar o, cuando ello no sea practicable, reducir en general las emisiones y el impacto en el conjunto del medio ambiente”, y a continuación se incluye la siguiente aclaración adicional de la citada definición:

“mejores”: las técnicas más eficaces para alcanzar un alto nivel general de protección del medio ambiente en su conjunto.

“técnicas”: la tecnología utilizada junto con la forma en que la instalación esté diseñada, construida, mantenida, explotada y paralizada;

“disponibles”: las técnicas desarrolladas a una escala que permita su aplicación en el contexto del sector industrial correspondiente, en condiciones económica y técnicamente viables, tomando en consideración los costes y los beneficios, tanto si las técnicas se utilizan o producen en el Estado

miembro correspondiente como si no, siempre que el titular pueda tener acceso a ellas en condiciones razonables.

Además, el Anexo IV de la Directiva contiene una lista de “aspectos que deben tenerse en cuenta con carácter general o en un supuesto particular cuando se determinen las mejores técnicas disponibles (...), teniendo en cuenta los costes y ventajas que pueden derivarse de una acción y los principios de precaución y prevención”.

Las autoridades competentes responsables de la concesión de permisos deben tener en cuenta los principios generales establecidos en el artículo 3 a la hora de determinar las condiciones del permiso. Estas condiciones deben incluir los valores límite de emisión, en su caso complementados o sustituidos por parámetros o medidas técnicas equivalentes. De acuerdo con el Artículo 9(4) de la Directiva, estos valores límite de emisión, parámetros y medidas técnicas equivalentes deben basarse – sin perjuicio del cumplimiento de las normas de calidad medioambiental – en las mejores técnicas disponibles, sin prescribir la utilización de una técnica o tecnología específica, sino tomando en consideración las características técnicas de la instalación de que se trate, su implantación geográfica y las condiciones locales del medio ambiente. En todos los casos, las condiciones del permiso deberán incluir disposiciones relativas a la reducción de la contaminación a larga distancia o transfronteriza y garantizar un alto nivel de protección para el medio ambiente en su conjunto.

Los Estados Miembros tienen la obligación, de acuerdo con el artículo 11 de la Directiva, de velar por que las autoridades competentes estén al corriente o sean informadas acerca de la evolución de las mejores técnicas disponibles.

3. OBJETIVO DEL PRESENTE DOCUMENTO

El apartado 2 del artículo 16 de la Directiva obliga a la Comisión a organizar “un intercambio de información entre los Estados miembros y las industrias correspondientes acerca de las mejores técnicas disponibles, las prescripciones de control relacionadas y su evolución” y a publicar los resultados de tal intercambio.

La finalidad del intercambio de información se establece en el considerando 25 de la Directiva, que estipula que “los avances y el intercambio de información en la Comunidad sobre las mejores técnicas disponibles contribuirán a reducir los desequilibrios tecnológicos en el ámbito de la Comunidad, ayudarán a la divulgación mundial de los valores límite establecidos y de las técnicas empleadas en la Comunidad y, asimismo, ayudarán a los Estados miembros para la aplicación eficaz de la presente Directiva.”

La Dirección General de Medio Ambiente de la Comisión Europea (DG Environment) ha creado un Foro de Intercambio de Información (IEF) para contribuir al cumplimiento de las disposiciones del apartado 2 del artículo 16 y en este marco se han creado varios grupos de trabajo técnico. Tanto en el foro como en los grupos de trabajo participan representantes de los Estados Miembros y del sector, de acuerdo con lo establecido en el apartado 2 del artículo 16.

El objetivo de esta serie de documentos es reflejar con precisión el intercambio de información que ha tenido lugar con arreglo a las disposiciones del apartado 2 del artículo 16 y facilitar información de referencia que las autoridades competentes deberán tomar en consideración a la hora de establecer las condiciones de concesión de los permisos. La importante información que estos documentos contienen con respecto a las mejores técnicas disponibles les convierte en instrumentos de gran valor para guiar el comportamiento en materia de medio ambiente.

4. FUENTES DE INFORMACIÓN

En este documento se resume la información obtenida de diversas fuentes, que incluye en especial los conocimientos técnicos de los grupos creados para ayudar a la Comisión en su trabajo, y que ha sido verificada por los servicios de la Comisión. Se agradecen efusivamente todas las aportaciones realizadas.

La información que contiene el presente documento tiene por objeto servir de punto de partida para el proceso de determinación de las MTD y como base para establecer las condiciones de concesión de los permisos. Con este fin, deberá tenerse siempre en cuenta el objetivo global de lograr el máximo grado posible de protección para el medio ambiente en su conjunto.

El resto de esta sección describe el tipo de información que contiene cada una de las secciones del documento.

Los Capítulos 1 y 2 proporcionan información general sobre el sector industrial afectado y sobre los procesos industriales utilizados en el sector. El Capítulo 3 proporciona datos e información acerca de los actuales niveles de emisiones y consumo, que reflejan la situación en las instalaciones existentes en el momento presente.

El Capítulo 4 describe con más detalle las técnicas de reducción de emisiones y otras técnicas que se consideran las más importantes para determinar las MTD, en términos generales y también como base para establecer las condiciones de concesión de los permisos. Esta información incluye los niveles de emisión y consumo que se pueden alcanzar utilizando la técnica en cuestión, cierta idea de los costes y de los efectos sobre otros medios imputables a dicha técnica y su grado de aplicabilidad a los diversos tipos de instalaciones que necesitan permisos de IPPC, sean nuevas o ya existentes, grandes o pequeñas. No incluye técnicas que generalmente se consideran obsoletas.

El Capítulo 5 presenta las técnicas y los niveles de emisión y consumo que se consideran compatibles con las MTD en términos generales. Se trata, pues, de dar indicaciones generales relativas a los niveles de emisión y consumo que podrían considerarse una referencia comparativa para las condiciones de concesión los permisos sobre la base de las MTD o para el establecimiento de reglas vinculantes generales según el Artículo 9(8). Sin embargo, hay que señalar que en este documento no se proponen valores límite de emisión. Para determinar las MTD es necesario tener en cuenta factores locales y específicos de la instalación, como sus características técnicas, situación geográfica y condiciones ambientales. En el caso de las instalaciones ya existentes, también es preciso analizar si su modernización es viable desde el punto de vista técnico y económico. El propio objetivo de conseguir un alto grado de protección para el medio ambiente en su conjunto suele comportar la toma de decisiones transaccionales entre distintos tipos de impacto ambiental, decisiones en las que a menudo influyen consideraciones locales.

Aunque se ha intentado tratar algunas de estas cuestiones, no es posible analizarlas con detalle en el presente documento. Por consiguiente, las técnicas y los niveles presentados en los subcapítulos 5 no tienen por qué ser necesariamente apropiados para todas las instalaciones. Por otra parte, la obligación de garantizar un alto grado de protección medioambiental, incluida la máxima reducción de la contaminación transfronteriza o de larga distancia, implica que no es posible establecer las condiciones de concesión de los permisos con arreglo a consideraciones puramente locales. Por ello, es esencial que las autoridades competentes en materia de permisos tengan muy en cuenta la información que contiene el presente documento.

Como las mejores técnicas disponibles cambian con el tiempo, este documento está sujeto a revisión y actualización. Todo comentario o sugerencia debe enviarse a la Oficina Europea de IPPC, emplazada en el Instituto de Estudios Tecnológicos Prospectivos, cuyas señas se indican a continuación:

World Trade Center

Isla de la Cartuja s/n
E-41092 Sevilla (España)
Teléfono: +34 95 4488 284
Fax: +34 95 4488 426
E-mail: eippcb@jrc.es
Internet: <http://eippcb.jrc.es>

Documento de Referencia sobre Mejores Técnicas Disponibles en la Industria de Fabricación de Vidrio

RESUMEN GENERAL	I
PREFACIO	XXI
1. INFORMACIÓN GENERAL	1
1.1. Ámbito del Documento.....	1
1.2. Introducción	2
1.2.1. Características del Vidrio	4
1.2.2. Clasificación General de los Tipos de Vidrios.....	5
1.2.3. Orígenes Históricos	6
1.3. Vidrio para Envases	7
1.3.1. Visión General del Sector	7
1.3.2. Productos y Mercados.....	8
Consideraciones Comerciales y Económicas.....	9
1.3.4. Principales Aspectos Medioambientales	10
1.4. Vidrio Plano	10
1.4.1. Visión General del Sector	10
1.4.2. Productos y Mercados.....	12
1.4.3. Consideraciones Comerciales y Económicas.....	13
1.4.4. Principales Aspectos Medioambientales	13
1.5. Fibra de Vidrio de Filamentos Continuos.....	14
1.5.1. Visión General del Sector	14
1.5.2. Productos y Mercados.....	15
1.5.3. Consideraciones Comerciales y Económicas.....	15
1.5.4. Principales Aspectos Medioambientales	16
1.6. Vidrio Doméstico	17
1.6.1. Visión General del Sector	17
1.6.2. Productos y Mercados.....	17
1.6.3. Consideraciones Comerciales y Económicas.....	18
1.6.4. Principales Aspectos Medioambientales	19
1.7. Vidrio Especial	19
1.7.1. Visión General del Sector	19
1.7.2. Productos y Mercados.....	20
1.7.3. Consideraciones Comerciales y Económicas.....	21
1.7.4. Principales Consideraciones Medioambientales	22
1.8. Lana Mineral	23
1.8.1. Visión General del Sector	23
1.8.2. Productos y Mercados.....	24
1.8.3. Consideraciones Comerciales y Económicas.....	25
1.8.4. Principales Aspectos Medioambientales	25
1.9. Fibra Cerámica.....	26
1.9.1. Visión General del Sector	26

1.9.2. Productos y Mercados	26
1.9.3. Consideraciones Comerciales	27
1.9.4. Principales Aspectos Medioambientales.....	27
1.10. Fritas.....	27
1.10.1. Visión General del Sector	27
1.10.2. Productos y Mercados	28
1.10.3. Consideraciones Comerciales	29
1.10.4. Principales Aspectos Medioambientales.....	29
2. PROCESOS Y TÉCNICAS APLICADAS.....	31
2.1. Manipulación de Materias primas	31
2.2. Fusión de Vidrio.....	32
2.2.1. Materias Primas para la Fabricación de Vidrio.....	32
2.2.2. El Proceso de Fusión.....	33
2.3. Técnicas de Fusión.....	35
2.3.1. Hornos Regenerativos	37
2.3.2. Hornos de Recuperación	39
2.3.3. Fusión con oxicombustión	39
2.3.4. Fusión Eléctrica.....	40
2.3.5. Fusión con Combinación de Combustibles Fósiles y Electricidad	41
2.3.6. Fusión en Discontinuo	41
2.3.7. Diseños Especiales de Hornos de Fusión	42
2.4. Vidrio para envases	42
2.5. Vidrio Plano	45
2.5.1. El Proceso del Vidrio Plano	46
2.5.2. Proceso de Laminación (Vidrio Grabado y con Hilos Metálicos (armado)	48
2.6. Fibra de Vidrio de Filamentos Continuos.....	49
2.7. Vidrio Doméstico	51
2.8. Vidrio Especial.....	53
2.9. Lana Mineral.....	57
2.9.1. Lana de Vidrio.....	57
2.9.2. Lana de Roca.....	59
2.10. Fibra Cerámica.....	61
2.11. Fritas.....	61
3. NIVELES ACTUALES DE EMISIONES Y CONSUMOS	65
3.1. Introducción	65
3.2. Visión General de la Industria del Vidrio	66
3.2.1. Entradas al Proceso	66
3.2.2. Salidas de los Procesos	68
3.2.2.1. Emisiones a la Atmósfera.....	69
3.2.2.2. Emisiones al Agua.....	71
3.2.2.3. Emisiones de otros Residuos.....	71
3.2.3. Energía	72
3.3. Vidrio para envases	75
3.3.1. Entradas al Proceso	76
3.3.2. Emisiones a la Atmósfera.....	77

3.3.2.1. Materias Primas.....	77
3.3.2.2. Fusión	77
3.3.2.3. Actividades de Acabado	80
3.3.3. Emisiones al Agua.....	80
3.3.4. Otros Residuos	81
3.3.5. Energía	81
3.4. Vidrio Plano	82
3.4.1. Entradas al proceso	82
3.4.2. Emisiones a la Atmósfera.....	83
3.4.2.1. Materias Primas.....	83
3.4.2.2. Fusión	83
3.4.2.3. Actividades de Acabado	84
3.4.3. Emisiones al Agua.....	85
3.4.4. Otros Residuos	85
3.4.5. Energía	85
3.5. Fibra de Vidrio de Filamentos Continuos.....	86
3.5.1. Entradas al Proceso	87
3.5.2. Emisiones a la Atmósfera.....	89
3.5.2.1. Materias Primas.....	89
3.5.2.2. Fusión	89
3.5.2.3. Actividades de Acabado	90
3.5.3. Emisiones al Agua.....	90
3.5.4. Otros Residuos	91
3.5.5. Energía	91
3.6. Vidrio Doméstico	92
3.6.1. Entradas al proceso	94
3.6.2. Emisiones a la Atmósfera.....	95
3.6.2.1. Materias Primas.....	95
3.6.2.2. Fusión	95
3.6.2.3. Actividades de Acabado	96
3.6.3. Emisiones al Agua.....	96
3.6.4. Otros Residuos	97
3.6.5. Energía	97
3.7. Vidrio Especial.....	98
3.7.1. Entradas al Proceso	98
3.7.2. Emisiones a la Atmósfera.....	100
3.7.2.1. Materias Primas.....	100
3.7.2.2. Fusión	101
3.7.2.3. Actividades de Acabado	101
3.7.3. Emisiones al Agua.....	102
3.7.4. Otros Residuos	102
3.7.5. Energía	102
3.8. Lana Mineral.....	103
3.8.1. Entradas al Proceso	103
3.8.2. Emisiones a la Atmósfera.....	104

3.8.2.1. Materias Primas.....	105
3.8.2.2. Fusión	105
3.8.2.3. Emisiones de Otras Actividades.....	107
3.8.3. Emisiones al agua.....	108
3.8.4. Otros Residuos	108
3.8.5. Energía	109
3.9. Fibra Cerámica.....	110
3.9.1. Entradas al Proceso	110
3.9.2. Emisiones a la Atmósfera.....	111
3.9.2.1. Materias Primas	111
3.9.2.2. Fusión	111
3.9.2.3. Actividades de Acabado	111
3.9.3. Emisiones al Agua.....	111
3.9.4. Otros Residuos	112
3.9.5. Energía.....	112
3.10. Fritas.....	112
3.10.1. Entradas al proceso	112
3.10.2. Emisiones a la Atmósfera.....	113
3.10.2.1. Materias primas	113
3.10.2.2. Fusión	113
3.10.2.3. Actividades de Acabado	114
3.10.3. Emisiones al Agua.....	114
3.10.4. Otros Residuos	114
3.10.5. Energía.....	114

4. TÉCNICAS A CONSIDERAR EN LA DETERMINACIÓN

DE LAS MTD	115
4.1. Introducción	115
4.2. Selección de la Técnica de Fusión.....	117
4.2.1. Fusión Eléctrica.....	119
4.3. Técnicas para la Manipulación de Materias primas	122
4.4. Técnicas para Controlar las Emisiones a la Atmósfera de las Actividades de Fusión	124
4.4.1. Partículas	124
4.4.1.1. Técnicas Primarias	126
4.4.1.2. Precipitadores Electrostáticos	131
4.4.1.3. Filtros de mangas	135
4.4.1.4. Colectores Mecánicos	138
4.4.1.5. Medios de Filtro a Alta Temperatura	139
4.4.1.6. Lavadores Húmedos	140
4.4.1.7. Resumen de las Consideraciones de las Técnicas de la Sección.....	140
4.4.2. Óxidos de Nitrógeno (NOx).....	142
4.4.2.1. Modificaciones de la Combustión.....	143
4.4.2.2. Formulación de la Mezcla.....	146
4.4.2.3. Diseños Especiales de Hornos	148
4.4.2.4. El proceso FENIX	149
4.4.2.5. Fusión con Oxícombustión	151

4.4.2.6. Reducción Química por Combustible (RQC)	159
4.4.2.7. Reducción Catalítica Selectiva (SRC)	165
4.4.2.8. Reducción No Catalítica Selectiva (SNRC)	169
4.4.2.9. Comparación de los Costes de las Técnicas de Eliminación de NOx	172
4.4.3. Óxidos de Azufre (SO _x).....	175
4.4.3.1. Selección de Combustible.....	175
4.4.3.2. Formulación de la Mezcla.....	176
4.4.3.3. Lavado Seco o Semiseco.....	178
4.4.4. Fluoruros (HF) y Cloruros (HCl).....	185
4.4.4.1. Reducción en Origen.....	185
4.4.4.2. Técnicas de Lavado	187
4.4.5. Óxidos de Carbono.....	187
4.5. Técnicas para Controlar las Emisiones a la Atmósfera de las Actividades no relacionadas con la Fusión	188
4.5.1. Vidrio para Envases.....	188
4.5.2. Vidrio Plano	189
4.5.3. Fibra de Vidrio de Filamentos Continuos	190
4.5.4. Vidrio Doméstico	191
4.5.5. Vidrio Especial	191
4.5.6. Lana Mineral	191
4.5.6.1. Zona de Moldeo	192
4.5.6.2. Horno de Polimerización.....	202
4.5.6.3. Enfriamiento del Producto	206
4.5.6.4. Mecanización y Embalaje del Producto.....	206
4.5.6.5. Olores Derivados de la Producción de Lana Mineral	206
4.5.7. Fibra Cerámica	208
4.5.8. Fritas.....	209
4.6. Técnicas para el Control de las Emisiones al Agua	209
4.7. Técnicas para Minimizar Otros Residuos	212
4.8. Energía	214
4.8.1. Técnica de Fusión y Diseño del Horno.....	214
4.8.2. Control de Combustión y Elección de Combustible	216
4.8.3. Uso de Casco de Vidrio.....	216
4.8.4. Caldera de Recuperación	218
4.8.5. Precalentamiento de la Mezcla y del Casco de Vidrio	219
5. MEJORES TÉCNICAS DISPONIBLES.....	223
5.1. Introducción	223
5.2 .Generalidades.....	224
5.2.1. Almacenamiento y Manipulación de Materias primas	226
5.2.2. Partículas	226
5.2.3. Óxidos de Azufre	227
5.2.4. Otras Sustancias	227
5.3. Vidrio para Envases	228
5.3.1. Polvo	228
5.3.2. Óxidos de Nitrógeno	228

5.3.3. Óxidos de Azufre	229
5.3.4. Otras Emisiones de la Fusión.....	229
5.3.5. Procesos de Acabado.....	230
5.4. Vidrio Plano	230
5.4.1. Polvo	230
5.4.2. Óxidos de Nitrógeno	230
5.4.3. Óxidos de Azufre	231
5.4.4. Otras Emisiones de la Fusión.....	231
5.4.5. Procesos de Acabado.....	231
5.5. Fibra de Vidrio de Filamentos Continuos.....	232
5.5.1. Polvo	232
5.5.2. Óxidos de Nitrógeno	232
5.5.3. Óxidos de Azufre	233
5.5.4. Otras Emisiones de la Fusión.....	233
5.5.5. Procesos de Acabado.....	233
5.6. Vidrio Doméstico	234
5.6.1. Polvo	234
5.6.2. Óxidos de Nitrógeno	234
5.6.3. Óxidos de Azufre	235
5.6.4. Otras Emisiones de la Fusión.....	236
5.6.5. Procesos de Acabado.....	236
5.7. Vidrio Especial.....	236
5.7.1. Polvo	236
5.7.2. Óxidos de Nitrógeno	237
5.7.3. Óxidos de Azufre	237
5.7.4. Otras Emisiones de la Fusión.....	237
5.7.5. Procesos de Acabado.....	238
5.8. Lana Mineral	238
5.8.1. Polvo	238
5.8.2. Óxidos de Nitrógeno	238
5.8.3. Óxidos de Azufre	239
5.8.4. Otras Emisiones de la Fusión.....	240
5.8.5. Procesos de Acabado.....	240
5.9. Fibra Cerámica.....	241
5.9.1. Fusión	241
5.9.2. Procesos de Acabado.....	242
5.10. Fritas.....	242
5.10.1. Polvo	242
5.10.2. Óxidos de Nitrógeno	242
5.10.3. Óxidos de Azufre	243
5.10.4. Otras Emisiones de la Fusión.....	243
5.10.5. Procesos de Acabado.....	243
5.11. Emisiones al Agua.....	243
5.12. Otros Residuos	244
6. TÉCNICAS EMERGENTES	247

6.1. Sistemas de Quemadores de Bajo NOx	247
6.2. Fusión con oxicombustión	248
6.3. Precalentamiento del Casco de Vidrio y de la Mezcla	248
6.4. Formulación de la Mezcla	248
6.5. Integración de Procesos de Fritas	249
6.6. Recirculación del Gas de Combustión.....	249
6.7. Programa de Investigación Glasulin	249
6.8. Nuevos Diseños de Hornos de Fusión.....	249
6.8.1. Horno de Fusión Segmentada Seg-Melter	249
6.8.2. Horno de Fusión Avanzado (Advanced Glass Melter o AGM).....	250
6.8.3. Horno de Fusión de Plasma	250
7. CONCLUSIONES FINALES	253
7.1. Intercambio de Información.....	253
7.2. Conclusiones Generales	253
7.3. Recomendaciones para Trabajos Futuros	254
8. ANEXO I: DATOS DE EMISIONES DE INSTALACIONES DE EJEMPLO	257
8.1.Sector de Vidrio para Envases	257
8.2. Sector de Vidrio Plano	258
8.3. Sector de Fibra de Vidrio de Filamentos Continuos.....	259
8.4. Sector de Vidrio Doméstico.....	260
8.5. Sector Vidrio Especial.....	261
8.6. Sector Lana Mineral.....	262
9. ANEXO II: EJEMPLO DE BALANCES DE AZUFRE PARA HORNOS DE VIDRIO INDUSTRIALES.....	265
10. ANEXO III: MEDICIÓN DE EMISIONES.....	267
10.1. Principales Contaminantes.....	267
10.2. Control de Emisiones.....	267
11. ANEXO IV: LEGISLACIÓN NACIONAL	275
GLOSARIO	289
REFERENCIAS	291

Lista de tablas

Tabla 1.1: Desglose aproximado por sectores de la producción de la industria del Vidrio	3
Tabla 1.2: Principales productores de vidrio para envases en la UE (1997)	8
Tabla 1.3: Distribución de las instalaciones de vidrio para envases en los Estados Miembros .	8
Tabla 1.4: Número de instalaciones de vidrio para envases en los rangos de producción especificados	8
Tabla 1.5: Situación de las líneas de flotado en la UE en 1997	11
Tabla 1.6: Número de líneas de flotado en los Estados Miembros en 1997	11
Tabla 1.7: Porcentaje de capacidad de flotación en los rangos especificados	12
Tabla 1.8: Número de instalaciones y hornos de filamentos continuos en los Estados Miembros	15
Tabla 1.9: Número de hornos de filamentos continuos en los rangos de producción especificados	15
Tabla 1.10: Número y distribución de las instalaciones de vidrio doméstico en los Estados Miembros en 1997	17
Tabla 1.11: Número de instalaciones de vidrio doméstico en los rangos de producción especificados (estimación)	17
Tabla 1.12: Desglose del Sector de Vidrio Especial	20
Tabla 1.13: Distribución de la producción de vidrio especial en la UE.	21
Tabla 1.14: Costes de inversión para instalaciones de vidrio especial	22
Tabla 1.15: Número de instalaciones de lana mineral en Estados Miembros	23
Tabla 1.16: Número de instalaciones de lana mineral en los rangos de producción especificados	24
Tabla 1.17: Distribución de las instalaciones de fibra cerámica en los Estados Miembros .	26
Tabla 1.18: Distribución de las instalaciones de fritas en los Estados Miembros (estimación)	28
Tabla 1.19: Número de instalaciones de fritas en los rangos de producción específicos (estimaciones)	28
Tabla 2.1: Materias primas importantes para la fabricación de vidrio	32
Tabla 2.2: Elementos utilizados para conferir color	33
Tabla 2.3: Estimación de los tipos de hornos en la UE en 1997 [tm18 CPIV]	36
Tabla 2.4: Composición típica del vidrio para envases	43
Tabla 2.5: Composición típica del vidrio plano	46
Tabla 2.6: Composición típica del Vidrio-E (E Glass)	49
Tabla 2.7: Composición química de los principales productos del Sector de Vidrio	56
Tabla 2.8: Composiciones típicas de las lanas minerales	57
Tabla 2.9: Composición química de las fibras refractarias típicas en tanto por ciento en peso	61
Tabla 3.1. Materias primas utilizadas en la Industria del Vidrio [tm18 CPIV]	68
Tabla 3.2: Resumen de emisiones a la atmósfera derivadas de las actividades de fusión .	70
Tabla 3.3: Posibles emisiones de metales pesados de los procesos del vidrio	71
Tabla 3.4: Requisitos energéticos teóricos para la fusión de formulaciones comunes de vidrio	73
Tabla 3.5: Ejemplos de consumo específico de energía para una serie de hornos de vidrio [tm41VDI2578]	74

Tabla 3.6: Resumen de las Entradas y Salidas del Sector de Vidrio para Envases [tm18 CPIV]	76
Tabla 3.7: Materias primas utilizadas en el Sector de Vidrio para envases (CPIV Jan98)	76
Tabla 3.8: Rangos de emisiones totales reportados para hornos del Sector de Vidrio para envases con medidas de eliminación primarias y secundarias.	79
Tabla 3.9. Percentil 80 medio de los rangos de emisiones de los hornos del Sector de Vidrio para envases con medidas de eliminación primarias y secundarias.	79
Tabla 3.10: Materias primas utilizadas en el Sector de Vidrio Plano	82
Tabla 3.11: Niveles de emisiones para hornos de vidrio plano con y sin eliminación	84
Tabla 3.12: Resumen de las entradas y salidas para el Sector de Fibra de Vidrio de Filamentos Continuos [tm18 CPIV]	87
Tabla 3.13: Materias primas utilizadas en el Sector de Fibra de Vidrio de Filamentos Continuos	88
Tabla 3.14: Niveles de emisiones para hornos de fibra de vidrio de filamentos continuos	89
Tabla 3.15: Resumen de Entradas y Salidas del Sector de Vidrio Doméstico	93
Tabla 3.16: Materias primas utilizadas en el Sector de Vidrio Doméstico	94
Tabla 3.17: Resumen de las emisiones a la atmósfera de los hornos de vidrio doméstico	96
Tabla 3.18: Materias primas utilizadas en el Sector de Vidrio Especial	99
Tabla 3.19: Resumen de entradas y salidas para un ejemplo de proceso de vidrio soluble [tm28 EMPA]	99
Tabla 3.19: Resumen de entradas y salidas para un ejemplo de proceso de vidrio para embudos de tubos de rayos catódicos	100
Tabla 3.20: Resumen de entradas y salidas para un ejemplo de proceso de vidrio para paneles de tubos de rayos catódicos (SCR integrada para reducción de NOx)	100
Tabla 3.22: Materias primas utilizadas en el Sector de Lana Mineral	103
Tabla 3.23: Volúmenes de gases de escape de los procesos de lana mineral	105
Tabla 3.24: Rango completo de emisiones de las actividades de fusión de la mineral	106
Tabla 3.25: 80 % medio de las emisiones de fusión de lana mineral	106
Tabla 3.26: Rango completo de emisiones de las líneas de lana mineral en mg/Nm ³	107
Tabla 3.27: Rango medio (80 %) de las emisiones de las líneas de lana mineral	108
Tabla 3.28: Generación y desecho de residuos sólidos en el Sector de Lana Mineral	109
Tabla 3.29: Consumo energético en la producción de lana mineral	110
Tabla 3.30: Materias primas utilizadas en el Sector de Fibra Cerámica	110
Tabla 3.31: Principales materias primas utilizadas en la producción de fritas	113
Tabla 3.32: Niveles de emisiones de los hornos de fritas	122
Tabla 4.1: Principales ventajas y desventajas de la fusión eléctrica	131
Tabla 4.2: Principales ventajas y desventajas de las técnicas primarias para la reducción de polvo	133
Tabla 4.3: Costes de precipitadores electrostáticos con lavado de gases ácidos [tm32 Beerkens]	135
Tabla 4.4: Principales ventajas y desventajas de los precipitadores electrostáticos	138
Tabla 4.5: Principales ventajas y desventajas de los filtros de mangas	139
Tabla 4.6: Principales ventajas y desventajas de los ciclones	146
Tabla 4.7: Principales ventajas y desventajas de las modificaciones de la combustión	158
Tabla 4.8: Principales ventajas y desventajas de la fusión con oxicombustión	162

Tabla 4.9: Principales ventajas y desventajas del Proceso 3R	167
Tabla 4.10: Costes de la SCR con precipitadores electrostáticos y lavado de gases ácidos ..	169
Tabla 4.11: Principales ventajas y desventajas de la SCR	171
Tabla 4.12: Costes de la SNCR	171
Tabla 4.13: Principales ventajas y desventajas de la SNCR	173
Tabla 4.14: Costes de inversión de las técnicas de eliminación	174
Tabla 4.15: Costes operativos anuales de las técnicas de eliminación	174
Tabla 4.16: Costes específicos de las técnicas de eliminación en euros/tonelada de vidrio ..	175
Tabla 4.17: Costes de la fusión con oxicombustión (euros/tonelada de combustible) para dos precios de oxígeno	175
Tabla 4.18: Emisiones indicativas de SOx en los gases residuales para distintos combustibles	176
Tabla 4.19: Variaciones en los precios de la energía en la UE. Fuente: CPIV	179
Tabla 4.20: Eficacias de absorción seca para Ca(OH) ₂ (Cifras orientativas)	179
Tabla 4.21: Velocidades de eliminación de SOx para lavado seco con Ca(OH) ₂	179
Tabla 4.22: Índices de eliminación de SOx para lavado seco con Na ₂ CO ₃	179
Tabla 4.23: Índices de eliminación de SOx para lavado semiseco con solución de Na ₂ CO ₃ ..	180
Tabla 4.24: Índices de eliminación de SOx para lavado semiseco con Ca(OH) ₂	180
Tabla 4.25: Principales ventajas y desventajas del lavado seco y semiseco	184
Tabla 4.26: Principales ventajas y desventajas de los PE húmedos	200
Tabla 4.27: Principales ventajas y desventajas de los filtros de lana de roca	202
Tabla 4.28: Principales ventajas y desventajas de la incineración	205
Tabla 4.29: Valores generales alcanzables para emisiones a la atmósfera de la línea de producción (mg/Nm ³)	207
Tabla 4.30: Costes de inversión y costes operativos de técnicas de eliminación	208
Tabla 4.31: Lista de posibles técnicas de tratamiento de aguas residuales para uso en la Industria del Vidrio	212
Tabla 5.1: Factores de conversión indicativos de mg/Nm ³ a kg/ tonelada de vidrio fundido ⁽¹⁾	226
Tabla 5.2: Clasificaciones de metales y sus compuestos	228
Tabla 10.1: Principales contaminantes cuya medición debe considerarse en la Industria del Vidrio	267
Tabla 10.2: Técnicas de medición continua	271
Tabla 10.3: Flujo de masa para medición continua (Francia y Alemania)	271
Tabla 10.4: Técnicas de medición discontinuas	272

Lista de Figuras

Figura 1.1. Producción total de vidrio de 1986 a 1996 (*excluidas fritas y fibras cerámicas)	4
Figura 2.1: Horno regenerativo de llama transversal	37
Figura 2.2: Sección transversal de un horno regenerativo	38
Figura 2.3: Horno regenerativo de llama de bucle de una sola pasada	38
Figura 2.4: Vista en planta de un horno regenerativo de llama de bucle	39
Figura 2.5: Moldeo por prensado-soplado y por soplado-soplado	44
Figura 2.6: Proceso de Vidrio Flotado	47
Figura 2.7: Proceso de Vidrio Laminado	48
Figura 2.8: El proceso de prensado para la formación de artículos de vidrio	52
Figura 2.9: Proceso de centrifugado para la formación de artículos de vidrio	52
<i>Lana de Vidrio</i>	
Figura 2.10: Una planta típica de lana de vidrio	57
Figura 2.11: Un circuito típico de agua de proceso para lana mineral	59
Figura 2.12: Planta típica de lana de roca	59
<i>Materias primas de formación de vidrio</i>	
Figura 3.1: Uso de la energía en una planta típica de vidrio para envases	81
Figura 3.2: Uso de energía para un proceso típico de vidrio	86
<i>Materias primas fundentes, estabilizantes y afinantes</i>	
Figura 3.3: Consumo energético en un proceso típico de fibra de vidrio de filamentos continuos	92
<i>Materias primas fundentes, estabilizantes y afinantes</i>	
Figura 3.4: Consumo energético en la fabricación de vidrio al plomo (horno de crisoles)	98
<i>Materias primas fundentes, estabilizantes y afinantes</i>	
Figura 4.1: Vista General del Proceso de Recombustión	163

CAPITULO 1. INFORMACIÓN GENERAL

1.1. Ámbito del Documento

Este documento cubre las actividades industriales especificadas en las Secciones 3.3 y 3.4 del Anexo 1 de la Directiva 96/61/CE, a saber:

- 3.3. Instalaciones para la fabricación de vidrio, incluida fibra de vidrio, con una capacidad de fusión de más de 20 toneladas diarias.
- 3.4. Instalaciones para la fusión de sustancias minerales, incluida la producción de fibras minerales, con una capacidad de fusión de más de 20 toneladas diarias.

Los tipos de actividades englobados en estas categorías son muy diversos en cuanto a su escala, las técnicas empleadas y los aspectos medioambientales asociados. A la hora de determinar si una instalación entra dentro de las definiciones del Anexo 1 se considera la capacidad agregada de todas las actividades de fusión de la instalación. A los efectos del presente documento, se ha escogido que el criterio de capacidad de fusión de 20 toneladas diarias haga referencia a la masa del material fundido producido. Este enfoque no pretende prejuzgar la interpretación de la definición de la Directiva, sino que pretende asegurar que la información facilitada sea consistente con la terminología estándar utilizada en la Industria del Vidrio.

A los efectos de este documento, las actividades industriales englobadas por las definiciones de las Secciones 3.3 y 3.4 del Anexo 1 de la Directiva 96/61/CE conforman la Industria del Vidrio, que se considera compuesta por ocho sectores. Esta división en sectores se basa en los productos fabricados, pero inevitablemente hay una cierta superposición entre ellos. Los ocho sectores son:

1. Vidrio para Envases
2. Vidrio Plano
3. Fibra de Vidrio de Filamentos Continuos
4. Vidrio para Uso Doméstico
5. Vidrio Especial (incluido Vidrio Soluble)
6. Lana Mineral (con dos subsectores, Lana de Vidrio y Lana de Roca)
7. Fibra Cerámica
8. Fritas

Además de las actividades básicas de fabricación, este documento cubre las actividades directamente asociadas que podrían tener efecto sobre las emisiones o la contaminación. Así, el documento incluye actividades que van desde la recepción de materias primas, pasando por la producción de productos intermedios, a la expedición de los productos acabados. No se cubren determinadas actividades, ya que no se consideran directamente asociadas con la actividad principal. Por ejemplo, no se cubre el proceso subsiguiente del vidrio plano en otros productos (Ej. doble vidriado o productos para automoción). De nuevo, este enfoque no intenta prejuzgar la interpretación de la Directiva por los Estados Miembros. Entre las actividades cubiertas se incluyen:

- Manipulación y almacenamiento de materias primas.
- Mezcla y transferencia.
- Fusión y afinado.

- Conformación (Ej. baño de flotación, laminación, soplado, fibrado, enfriamiento de fritas).
- Acondicionamiento (Ej. túnel de recocido, recocido, revenido).
- Recubrimiento (aplicación de capas), incluida la aplicación de aglomerantes y lubricantes.
- Tratamientos superficiales (Ej. pulido al ácido).
- Actividades de polimerización y secado.
- Molturación.
- Mecanización, corte y embalaje
- Almacenamiento, manipulación y proceso de residuos.

1.2. Introducción

[tm18 CPIV, CPIV stats, EURIMA stats]

La Industria del Vidrio dentro de la Unión Europea (UE) es extremadamente diversa, tanto en los productos fabricados como en las técnicas de fabricación empleadas. Los productos van desde sofisticadas copas de vidrio al plomo elaboradas a mano hasta grandes volúmenes de vidrio flotado producidos para los sectores de construcción y automoción. Las técnicas de fabricación varían desde pequeños hornos eléctricos en el sector de fibras cerámicas a hornos regenerativos de llama transversal en el sector del vidrio plano con producciones de hasta 700 toneladas al día. La industria del vidrio más amplia incluye asimismo muchas instalaciones pequeñas que no llegan al umbral de 20 toneladas diarias. No obstante, para algunos de los datos estadísticos facilitados en este capítulo no ha sido posible separar la contribución de las plantas menores, aunque la misma no se considera significativa, ya que representan menos del 5% de la producción total de la industria.

La Industria del Vidrio es esencialmente una industria de artículos, aunque se han desarrollado muchos modos de añadir valor a productos de gran volumen para asegurar que la industria se mantenga competitiva. Más del 80% de la producción de la industria se vende a otras industrias, y la industria del vidrio en su conjunto depende mucho del sector de la construcción, así como del sector alimentario y de bebidas. No obstante, esta imagen general no es cierta para todos sus componentes, ya que algunos de los sectores de menor volumen producen productos técnicos o de consumo de alto valor.

A finales de los años noventa, la Industria del Vidrio sigue en un periodo de reorganización. Con el fin de reducir costes y competir de forma más eficaz en un mercado global, y beneficiarse de la economía de escala, las empresas se fusionan, con lo que el número de empresas independientes se reduce. Los grupos que dominan la industria se hacen más internacionales en sus actividades, y los usuarios exigen cada vez más una calidad homogénea, independientemente del país en el que se utilizan los productos. La Industria del Vidrio de la UE está al frente de los desarrollos tecnológicos, por lo que es probable que se beneficie de una mejora en su rendimiento industrial en los años futuros.

Con la notable excepción de Saint-Gobain, hay pocas grandes empresas que operen en más de dos de los ocho sectores especificados en la sección anterior. Por ejemplo, Owens Corning Corporation se especializa en tecnología de fibra de vidrio, fibra de vidrio de filamentos continuos y lana de vidrio. PPG es un gran productor internacional de vidrio plano y de fibra de vidrio de filamentos continuos. Y el Grupo Pilkington está especializado principalmente en actividades de vidrio plano.

Los principales retos medioambientales para la Industria del Vidrio son las emisiones a la atmósfera y el consumo energético. La fabricación de vidrio es una actividad a alta temperatura y con un uso intensivo de energía, que produce la emisión de productos de combustión y la oxidación a alta temperatura del nitrógeno atmosférico, es decir, dióxido de azufre, dióxido de carbono y óxidos de nitrógeno. Las emisio-

nes de los hornos contienen asimismo polvo, derivado principalmente de la volatilización y condensación subsiguiente de los compuestos volátiles de la mezcla. Se estima que en 1997 las emisiones de la industria del vidrio a la atmósfera consistieron en: 9000 toneladas de polvo; 103500 toneladas de NOx; 91500 toneladas de SOx; y 22 millones de toneladas de CO₂ (incluida la producción de energía). Esto supuso alrededor del 0,7% de las emisiones totales de la UE de estas sustancias. El consumo total de energía de la industria del vidrio fue de aproximadamente 265 PJ.

Las emisiones al medio acuático son relativamente bajas y hay pocos aspectos importantes que sean específicos de la Industria del Vidrio. No obstante, hay aspectos de la contaminación del agua en algunos sectores, que se cubren en las secciones específicas del presente documento. Los niveles de residuos sólidos son también muy bajos por lo general, y se han puesto en práctica muchas iniciativas para reducir la producción de residuos, así como para reciclar los residuos internos y de consumo.

En general, las materias primas para la fabricación de vidrio se hallan fácilmente disponibles, siendo sustancias naturales o sintéticas relativamente inocuas. No hay problemas medioambientales importantes asociados con el suministro de las materias primas, y los niveles de residuos son normalmente muy bajos.

Muchos de los sectores de la Industria del Vidrio utilizan grandes hornos en continuo con períodos de vida de hasta doce años. Estos hornos suponen una gran inversión de capital, y el funcionamiento continuo del horno y la reconstrucción periódica ofrecen un ciclo de inversión natural en el proceso. Los cambios importantes en la tecnología de fusión se realizan de forma más económica si coinciden con reconstrucciones del horno. Esto puede también ser cierto para las medidas complejas de eliminación secundaria, que deben estar correctamente dimensionadas y contar con el necesario acondicionamiento de los gases. No obstante, durante las campañas de operación del horno es posible realizar muchas mejoras en el funcionamiento del horno, incluida la instalación de técnicas secundarias. Para hornos más pequeños con reconstrucciones más frecuentes y menores costes de inversión, las ventajas de coordinar las mejoras medioambientales y las reparaciones de los hornos son menos significativas, aunque las mejoras medioambientales pueden ser más económicas si se coordinan con otras inversiones.

La producción total estimada de la industria del vidrio dentro de la UE en 1996 fue de 29 millones de toneladas (excluidas fibras cerámicas y fritas). En la tabla 1.1 se facilita un desglose orientativo por sectores. Ha habido un crecimiento constante del volumen global de ventas a lo largo de la última década. No obstante, ha habido fluctuaciones en cada sector, que se discuten más adelante en el documento. El crecimiento en la producción total de vidrio de la UE, y en la producción de los tres mayores sectores, entre 1986 y 1996 se resumen en la Figura 1.1.

Sector	% de la Producción Total de la UE (1996)
Vidrio para Envases	60
Vidrio Plano	22
Fibra de Vidrio de Filamentos Continuos	1,8
Vidrio Doméstico	3,6
Vidrio Especial	5,8
Lana Mineral	6,8
Fibra Cerámica	-
Fritas de Vidrio y Fritas Esmaltadas	-

Tabla 1.1. Desglose aproximado por sectores de la producción de la industria del vidrio

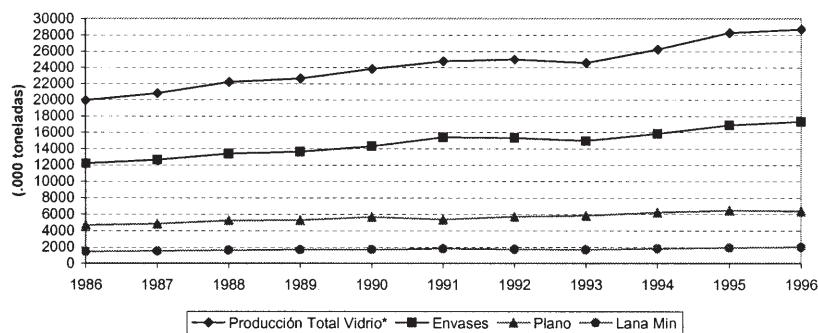


Figura 1.1. Producción total de vidrio de 1986 a 1996 (*excluidas fritas y fibras cerámicas)

Las producciones de los distintos sectores son muy diversas, y las conexiones entre los sectores son tenues en ocasiones. No obstante, el hilo común que conecta todas las actividades discutidas en este documento es la fusión de materias primas inorgánicas para formar vidrio fundido, o una sustancia similar al vidrio, sustancia que luego se conforma en productos.

En muchos sentidos, cada uno de los sectores de la Industria del Vidrio es una industria separada por derecho propio, ya que cada uno produce productos muy distintos para distintos mercados y afronta distintos retos. Las secciones 1.3 a 1.10 de este capítulo dan un breve resumen de cada uno de los sectores, e intentan detallar algunos de los factores importantes que afectan a cada uno de ellos. Las distintas estructuras, organizaciones y prioridades de cada sector implican que la información varía en ocasiones en cuanto a su naturaleza y el grado de detalle. Esto era de esperar, ya que la importancia relativa de ciertos parámetros difiere de un sector a otro.

1.2.1. Características del Vidrio

[tm21 Schott]

El término vidrio no tiene una definición sencilla y cómoda. En su sentido más amplio, vidrio es un término colectivo para un número ilimitado de materias primas de distintas composiciones en un estado vítreo. Más específicamente, el término se utiliza en relación con un estado de la materia inorgánica que puede asimilarse a un sólido, pero que tiene las propiedades de un líquido extremadamente viscoso, y no presenta estructura cristalina ni un punto de fusión definido, es decir, un líquido superenfriado. En la Industria del Vidrio, el término se utiliza normalmente en referencia los vidrios de silicatos, sustancias que contienen una elevada proporción de sílice (SiO_2) y que normalmente forman vidrios en condiciones normales de enfriamiento a partir del estado fundido.

Los vidrios son similares estructuralmente a los líquidos, pero a temperaturas ambiente reaccionan al impacto de una fuerza con deformación elástica, por lo que también debe considerarse que se comportan como sólidos. El uso del término vidrio está normalmente restringido a sustancias inorgánicas, y no se utiliza en conexión con sustancias orgánicas como plásticos transparentes.

Diversos productos químicos pueden formar una estructura vítreo, como los óxidos de silicio, boro, germanio, fósforo y arsénico. Cuando se enfrián rápidamente desde el estado fundido, solidifican sin cristalización para formar vidrios. Estos formadores de vidrio presentan el mismo comportamiento cuando se mezclan con otros componentes metálicos dentro de ciertos límites de composición. La adición de estos componentes modificadores del vidrio (como óxidos de calcio y aluminio) altera las relaciones de los enlaces y los grupos estructurales, lo que produce cambios en las propiedades físicas y químicas del vidrio. El estado vítreo no se limita a óxidos, sino que puede observarse al enfriar rápidamente ciertos compuestos de azufre y de selenio. En condiciones extremas puede crearse vidrio a partir de algunas aleaciones metálicas libres de óxidos, y muchos líquidos orgánicos se transforman en un estado vítreo a temperaturas bajas (Ej. glicerina a -90°C).

Los vidrios son inestables energéticamente en comparación con un cristal de la misma composición química. En general, cuando se enfriá una sustancia fundida, la cristalización comienza cuando la temperatura cae por debajo del punto de fusión. En el vidrio, esto no ocurre debido a que los bloques de la estructura molecular (Tetraedros de SiO_4 en el vidrio de silicato) están espacialmente unidos entre sí. Para formar cristales primero deben romperse estas uniones de modo que puedan formarse los núcleos de los cristales. Esto sólo puede ocurrir a temperaturas muy bajas, pero a esas temperaturas la viscosidad del material fundido impide la reestructuración de las moléculas y el crecimiento de cristales. En general, la tendencia a cristalizar (desvitrificación) disminuye al aumentar la velocidad de enfriamiento (dentro del rango de temperatura crítica por debajo del punto de fusión) y con el número y tipo de los distintos componentes presentes en la formulación.

Las propiedades mecánicas del vidrio son más bien específicas. La resistencia real a la tensión del vidrio es varios cientos de veces menor que el valor teórico calculado a partir de las energías de los enlaces químicos. La resistencia a la tensión depende fuertemente del estado de la superficie del vidrio y de la presencia de defectos internos. Tratamientos como el recubrimiento (aplicación de capas), el pulido al fuego y el templado pueden mejorar enormemente la resistencia a la tensión, aunque todavía seguirá bastante por debajo del valor teórico.

Muchas formulaciones de vidrio son también susceptibles de romperse tras cambios de temperatura rápidos. Existen varios motivos para ello, principalmente la mala conductividad térmica, el coeficiente de dilatación térmica relativamente alto de los vidrios ricos en álcalis, y la limitada resistencia mecánica.

Los vidrios se dividen en dos categorías; los que tienen un coeficiente de dilatación térmica inferior a $6 \times 10^{-6}/\text{K}$ se denominan vidrios duros, y los que tienen un coeficiente de dilatación térmica mayor se denominan vidrios blandos.

1.2.2. Clasificación General de los Tipos de Vidrios [tm21 Schott]

La clasificación más ampliamente usada de tipo de vidrio es por su composición química, que da lugar a cuatro grupos principales: vidrio sodocálcico, vidrio al plomo, vidrio de borosilicato y vidrio especial. Las tres primeras de estas categorías representan más del 95% de todo el vidrio producido. Los miles de formulaciones de vidrio especial producidos anualmente, básicamente en cantidades pequeñas, representan el 5% restante. Con muy pocas excepciones, la mayoría de vidrios son a base de silicatos, cuyo componente principal es el dióxido de silicio (SiO_2).

La lana de roca es una excepción a esta clasificación de tipos de vidrios por el hecho de que su composición química no encaja en ninguna de estas categorías. En la Tabla 2.8 se presenta una composición típica de la lana de roca.

Vidrios al sodio y calcio

La gran mayoría de vidrios producidos industrialmente tienen composiciones muy similares y se denominan colectivamente vidrios sodocálcicos. Un típico vidrio sodocálcico se compone de un 71 - 75 % de dióxido de silicio (SiO_2 , aportado principalmente por la arena), un 12 - 16 % de óxido sódico ('sosa' Na_2O del carbonato sódico – Na_2CO_3), y un 10 - 15 % de óxido cálcico (CaO de la piedra caliza – CaCO_3) y niveles bajos de otros componentes diseñados para conferir propiedades específicas al vidrio. En algunas composiciones, una parte del óxido cálcico o del óxido sódico se sustituye por óxido magnésico (MgO) y óxido potásico (K_2O) respectivamente. En el Capítulo 2 se indican de forma más detallada las composiciones del vidrio.

El vidrio sodocálcico se utiliza para botellas, tarros, vajillas corrientes y vidrio para ventanas. El amplio uso del vidrio sodocálcico se deriva de sus propiedades químicas y físicas. Entre las más importantes de estas propiedades se encuentra la excelente transmisión lumínica del vidrio sodocálcico, de ahí su uso en artículos transparentes y de vidrio plano. También tiene una superficie lisa y no porosa que es

muy inerte químicamente, por lo que se limpia fácilmente y no afecta el sabor del contenido. Las características de resistencia a la tensión y térmicas del vidrio son suficientes para estas aplicaciones, y las materias primas son comparativamente baratas y económicas de fundir. Cuanto mayor es el contenido alcalino del vidrio, mayor es su coeficiente de dilatación térmica y menor es su resistencia al choque térmico y al ataque químico. Los vidrios sodocálcicos no son generalmente adecuados para aplicaciones extremas o cambios rápidos de temperatura.

Vidrio al plomo y vidrio de cristal

El óxido de plomo puede usarse para sustituir gran parte del óxido de calcio de la mezcla para obtener un vidrio conocido popularmente como vidrio al plomo. Una composición típica es 54 - 65 % SiO₂, 25 - 30 % PbO (óxido de plomo), 13 - 15 % Na₂O o K₂O, más otros diversos componentes minoritarios. Este tipo de formulación, con un contenido en óxido de plomo de más del 24%, produce un vidrio de alta densidad e índice de refracción, lo que le da excelentes características de brillo y sonoridad, así como una excelente trabajabilidad, lo que permite una amplia variedad de formas y decoraciones. Los productos típicos son vasos de bebida, licoreras, boles y elementos decorativos de alta calidad. El óxido de plomo puede ser sustituido total o parcialmente por óxidos de bario, zinc o potasio en vidrios que se denominan vidrio de cristal, de menor brillo o densidad que el vidrio al plomo. En la Directiva 69/493/CEE se establecen definiciones precisas asociadas con sus características químicas y físicas.

Vidrios de borosilicato

Los vidrios de borosilicato contienen trióxido de boro (B₂O₃) y un mayor porcentaje de dióxido de silicio. Una composición típica es 70 - 80 % SiO₂, 7 - 15 % B₂O₃, 4 - 8 % Na₂O o K₂O, y 2 - 7 % Al₂O₃ (óxido de aluminio). Los vidrios con esta composición presentan una elevada resistencia a la corrosión química y a los cambios de temperatura (bajo coeficiente de dilatación térmica). Entre sus aplicaciones se incluyen componentes para procesos químicos, equipo de laboratorio, envases farmacéuticos, iluminación, utensilios de cocina, y puertas de horno y hornillos. Muchas de las formulaciones de borosilicato son para aplicaciones técnicas de bajo volumen y se considera que se engloban en la categoría de vidrio especial.

Otra aplicación del vidrio de borosilicato es la producción de fibra de vidrio, tanto de filamentos continuos como lanas de vidrio. Además de la resistencia química y el bajo coeficiente de dilatación térmica, el trióxido de boro es importante en el fibrado del vidrio fundido. Las composiciones típicas de la fibra de vidrio difieren de la composición arriba indicada. Por ejemplo, la composición del Vidrio-E (E-Glass) es SiO₂ 53 - 60 %, óxidos alcalinotérreos 20 - 24 %, B₂O₃ 5 - 10 %, Al₂O₃ 5 - 10 % más otros componentes minoritarios. También debe notarse que para la fibra de vidrio de filamentos continuos, las nuevas formulaciones bajas en boro o sin boro están adquiriendo cada vez mayor importancia.

Vidrio Especial

Se trata de un grupo extremadamente diverso, que cubre productos especializados de alto valor y bajo volumen de producción, cuyas composiciones varían muy ampliamente según las propiedades requeridas de los productos. Algunas de sus aplicaciones son: productos especiales de borosilicato; vidrio óptico; vidrio para electrotecnología y electrónica; tubos de rayos catódicos; elementos de sílice fundido; juntas de vidrio; tubos de rayos X; soldadores de vidrio; vidrio sinterizado; electrodos; y cerámicas de vidrio. En el Capítulo 2 se facilita más información sobre las formulaciones de los vidrios técnicos.

1.2.3. Orígenes Históricos

[tm18 CPIV, tm21 Schott]

Los productos vítreos ocurren naturalmente. Por ejemplo, la obsidiana o lava vítreas se encuentra a menudo en zonas volcánicas y tiene una composición comparable al vidrio sintético. Este material, compuesto principalmente de dióxido de silicio y compuestos de sodio y calcio, fue utilizado por los hombres primitivos para hacer puntas de flecha, puntas de lanza y cuchillos. Otras formas naturales del vidrio son las

tectitas, formadas por la solidificación de la roca fundida que se esparce por la atmósfera cuando los meteoritos chocan con la superficie de la tierra; y las fulguritas, que se forman cuando caen rayos en la arena.

Aunque no se conoce cuando se produjo vidrio artificialmente por vez primera, los hallazgos más antiguos datan de alrededor de 3500 A.C. Se cree que la elaboración de vidrio tuvo su origen en Egipto y Mesopotamia, aunque también se desarrolló más tarde y de forma independiente en China, Grecia y el Norte del Tirol. La fabricación de vidrio en la antigüedad se cree que estaba asociada con la producción de cerámicas o bronce, de donde pudo haberse originado como subproducto. Sus principales usos eran como joyería y para recipientes pequeños. La producción comenzó a aumentar significativamente a partir del año 1500 A.C., cuando se comenzaron a producir elementos de mayor tamaño y más utilitarios (boles, recipientes y copas) moldeando el vidrio alrededor de un núcleo de arena o arcilla. La primera gran revolución técnica en la fabricación del vidrio tuvo lugar en el primer siglo D.C. en Palestina o Siria, con el descubrimiento del tubo de soplado de vidrio. Esta técnica suponía la colocación del vidrio fundido en el extremo del tubo de soplado, por el que el artesano soplaba para formar un cuerpo hueco. Esta técnica permitió la producción de una amplia variedad de formas y se extendió por todo occidente, por ejemplo a Italia y Francia.

La fabricación de vidrio en Europa prosiguió su desarrollo en la Edad Media, y Venecia se convirtió en el centro europeo del arte del vidrio. En el siglo XIV se establecieron talleres de vidrio en todo el continente, y al mismo tiempo se desarrolló en Francia la fabricación de vidrio plano para esmerilado. Durante siglos, el vidrio para ventanas se soplaba con un tubo de soplado de vidrio en grandes cuerpos cilíndricos, siendo cortado y planchado a la forma plana todavía en caliente. Sólo podían manipularse cantidades reducidas de vidrio, por lo que el vidrio para ventanas era muy pequeño. La nueva técnica consistía en soplar una esfera de vidrio con un tubo, que luego se abría por el extremo opuesto al del tubo de soplado, y se centrifugaba en plano. Tras el descubrimiento del proceso de vertido en placa en 1868 bajo el reinado de Luis XIV, pudieron crearse espejos de gran superficie. Simultáneamente, los fabricantes de vidrio ingleses desarrollaron el vidrio al plomo, que producía un vidrio de gran brillo y timbre puro.

En el siglo XVIII, algunas fábricas producían ya más de 1 millón de botellas al año (alrededor de 3 toneladas/día), mediante técnicas manuales de soplado con la boca. Durante la revolución industrial del siglo XIX, el progreso técnico se aceleró: los hornos pasaron a calentarse con carbón en lugar de madera; se utilizaron las primeras máquinas automáticas; y el soplado pasó a hacerse con aire comprimido en moldes metálicos. Al final del siglo XIX, Friedrich Siemens inventó el horno continuo, que permitió la producción en continuo a gran escala y el uso de maquinaria.

En el siglo XX se realizaron dos importantes pasos: La plena mecanización de la fabricación de botellas con la introducción de la primera máquina IS (Sección Individual) alrededor de 1920, y la invención del proceso de flotado para el vidrio plano en 1962. Hoy, la producción de una máquina de IS puede ser de más de 500 botellas/minuto, y la producción de vidrio flotado puede ser de 900 t/d.

1.3. Vidrio para Envases

1.3.1. Visión General del Sector

[tm18 CPIV, CPIV stats]

La producción de vidrio para envases es el mayor sector de la industria del vidrio de la UE, y representa alrededor del 60% de la producción total de vidrio. El sector cubre la producción de envases de vidrio, como botellas y frascos, aunque algunas vajillas fabricadas a máquina también pueden producirse en este sector. En 1997, el sector produjo más de 17,3 millones de toneladas de productos de vidrio en los 295 hornos en funcionamiento en la UE. Hay aproximadamente 70 empresas con 140 instalaciones, y el sector da empleo directamente a 50000 personas. El vidrio para envases se produce en todos los Estados Miembros con la excepción de Luxemburgo, y la producción ha aumentado anualmente un 1,8% en promedio (ver Figura 1.1) con ventas en 1996 de más de 6000 millones de euros.

Más del 50% de la producción de la UE la realizan los diez mayores productores, que se muestran en la Tabla 1.2 inferior. Las empresas están ordenadas alfabéticamente y no en orden de tamaño. En el momento de redactar el presente documento, el mayor productor de vidrio para envases de la UE era el grupo francés Saint-Gobain seguido de Danone, Gerresheimer y AVIR. Europa Occidental es el mayor productor de vidrio para envases, seguido de Estados Unidos y Japón. La distribución geográfica del sector y el rango de tamaños de las instalaciones se muestra en las Tablas 1.3 y 1.4.

Empresa	País	Propiedad
B S N	Francia	Grupo Danone (Francia)
Saint Gobain Emballage	Francia	Saint Gobain (Francia)
Gerresheimer Glas	Alemania	VIAG (Alemania)
Oberland Glas	Alemania	Saint Gobain (Francia)
AVIR	Italia	Owens Illinois (EE.UU.)
Vetterie Italiane VETRI	Italia	Saint Gobain (Francia)
Vereenigde Glasfabrieken	Holanda	Danone Group (Francia)
Vicasa	España	Saint Gobain (Francia)
Rockware Glass	Reino Unido	Owens Illinois (EE.UU.)
United Glass	Reino Unido	Owens Illinois (EE.UU.)

Tabla 1.2: Principales productores de vidrio para envases en la UE (1997)

Estado Miembro	Número de Instalaciones	Número de Hornos	% de la Producción de la UE
Alemania	33	70	26
Francia	22	54	20
Italia	32	54	17
Reino Unido	14	32	11
España	14	23	10
Portugal	6	17	
Holanda	5	13	
Austria	4	9	
Bélgica	4	9	
Grecia	2	5	
Finlandia	1	2	
Dinamarca	1	3	
Irlanda	1	2	
Suecia	1	2	
Total	140	295	17.316.000 t. en 1997

Tabla 1.3: Distribución de las instalaciones de vidrio para envases en los Estados Miembros

Rango de Producción (Toneladas/día)	<150	150 a 300	300 a 600	600 a 1.000	>1.000
Número de Instalaciones en Cada Rango	14	37	57	28	4

Tabla 1.4: Número de instalaciones de vidrio para envases en los rangos de producción especificados

1.3.2. Productos y Mercados [tm18 CPIV]

El vidrio para envases se elabora a partir de una formulación básica de sosa y cal y se funde en un horno de combustible fósil o, excepcionalmente, eléctrico. El vidrio fundido se conforma normalmente en los productos mediante máquinas automáticas de Sección Individual (IS). Cuando procede, se agregan agentes colorantes al vidrio o se aplican recubrimientos superficiales a los productos acabados.

Los productos más importantes del sector de vidrio para envases son botellas de vino, cerveza, licores, refrescos, etc., así como tarros de cuello ancho para la industria alimentaria. Estos productos se consideran generalmente como artículos de consumo, pero otra parte importante del sector es la producción de

envases de gama alta para las industrias farmacéutica y de perfumería. La mayoría de la producción se vende a industrias clientes dentro de la UE, que luego venden sus productos envasados a mercados en la UE y el resto del mundo. La importancia relativa de las distintas industrias clientes varía considerablemente entre los distintos Estados Miembros. Esto se refleja en la gran diversidad de mercados nacionales para envases de vidrio y los productos que requieren, particularmente en cuanto a color, forma, tamaño y diseño.

Hay tres grandes sectores de industrias clientes. El sector de bebidas representa aproximadamente el 75% del tonelaje total de los envases de vidrio. Esto incluye los vinos normales y espumosos, vinos concentrados, licores, cervezas, refrescos, zumos de frutas y aguas minerales. El sector alimentario representa alrededor del 20% del tonelaje (principalmente tarros). Esto cubre una amplia gama de productos, como conservas húmedas y secas, leche y productos lácteos, confituras y pastas para untar, salsas y aliños, aceite, vinagre, etc. Los envases de perfumería y farmacia son generalmente botellas pequeñas (frascos) y representan el 5% restante aproximadamente del tonelaje de vidrio para recipientes.

Una característica importante del sector es que las distancias de suministro están por lo general limitadas a unos pocos cientos de kilómetros, ya que para los envases vacíos el coste del transporte es relativamente elevado en comparación con el precio de venta. Además, existen mercados específicos locales o regionales con envases de vidrio característicos, particularmente en las bebidas alcohólicas (distintas regiones vinícolas, whisky, coñac, champán y cerveza), lo que ha actuado contra una rápida concentración del mercado. De hecho, incluso cuando las empresas han sido absorbidas por grupos más grandes, tienden a conservar su identidad y sus clientes locales.

Consideraciones Comerciales y Económicas [tm18 CPIV, CPIV stats]

El Vidrio para envases es una industria madura que sirve a mercados extremadamente dinámicos, y que ha experimentado un crecimiento global lento durante la última década. Hay inevitables cambios locales o temporales, pero la tendencia general se espera que continúe a medio plazo. Sin embargo, la competencia de los envases alternativos se espera que presente una amenaza cada vez mayor para el sector.

Durante 1997, con variaciones regionales, el sector utilizó aproximadamente un 90% de su capacidad de producción, con una variación entre el 84% y el 95% con respecto a la década anterior. El gran número de hornos y la naturaleza competitiva del negocio proporcionan un grado de autorregulación de la capacidad. Aunque los hornos tienen vidas operativas largas, el gran número de hornos significa que en un año dado una parte importante de la capacidad deberá ser sometida a reconstrucción. En el Sector de Vidrio para envases, el exceso de capacidad suele ser localizado y a corto plazo. La competencia de los materiales alternativos es un factor significativo para los niveles de precios.

Debido a los costes de transporte, la mayoría de productos se venden en un radio de 500 Km. del punto de producción, por lo que las importaciones y exportaciones tienden a ser bastante limitadas. Durante 1997, las exportaciones de la UE superaron a las importaciones alrededor de un 8%, es decir, 453.000 toneladas frente a 417.000 toneladas. El comercio total fuera de la UE representa sólo el 5% de la producción del sector, de 17,3 millones de toneladas. No obstante, las zonas situadas en los márgenes de la UE pueden sufrir una competencia bastante seria de países de fuera de la UE, que con frecuencia ofrecen precios considerablemente menores y una calidad aceptable. Esto es particularmente cierto para productos de bajo valor. No obstante, es importante recordar que aunque los envases se vendan localmente, los artículos envasados pueden depender fuertemente del comercio extracomunitario.

Hay una amplia gama de factores que pueden afectar el mercado del vidrio para envases. La principal amenaza es la de los materiales de envase alternativos, especialmente metales (acero y aluminio) y plásticos. Las principales desventajas del vidrio son su mayor peso (y por tanto mayor coste de transporte) y riesgo de rotura. Las principales ventajas del vidrio son su facilidad de limpieza y reutilización, reciclabilidad, transparencia, ser inerte químicamente, y su percepción de calidad para productos de categoría. La posición relativa del vidrio con respecto a sus competidores varía ampliamente entre regiones y productos, según las preferencias del mercado, los costes y los nuevos desarrollos de envases.

Otros factores importantes están asociados con fluctuaciones en la demanda de los productos envasados. Por ejemplo, los cambios en los hábitos de los consumidores, como la tendencia hacia el consumo de menores volúmenes de vino pero de mejor calidad. Los factores climáticos como el volumen de las vendimias y el aumento en el consumo de cerveza y refrescos durante los veranos calurosos pueden también tener importancia. Las fluctuaciones en los tipos de cambio extranjeros y las coyunturas económicas locales también afectan los artículos de gama alta como perfumes y licores.

La fabricación de vidrio es una industria con elevados costes de inversión, lo que restringe la entrada en el mercado a empresas bastante grandes con recursos financieros sustanciales. El lento crecimiento a largo plazo significa que, aunque se construyan nuevos hornos, tienden a ser construidos por compañías que ya operan en esa región, o por otras empresas existentes que entran en esa región. Gran parte del crecimiento en las ventas se consigue modernizando plantas existentes en las reconstrucciones programadas. Globalmente hay una tendencia a transferir la propiedad de las empresas pequeñas a empresas grandes.

En general, los hornos de vidrio para envases operan de forma continua, o con pequeñas reparaciones intermedias, durante un periodo de hasta 12 años, tras el cual son remodelados o reconstruidos con una sustitución parcial o total de la estructura, según su estado. La reconstrucción directa de un horno de tamaño medio (unas 250 toneladas diarias) se sitúa en torno a 3- 5 millones de euros. El gasto real puede ser mayor, ya que la reconstrucción puede realizarse en un momento conveniente para realizar modernizaciones en el proceso. Una nueva planta de tamaño comparable en un centro en campo verde costaría alrededor de 40 – 50 millones de euros, incluida infraestructura y servicios.

1.3.4. Principales Aspectos Medioambientales

El principal problema medioambiental asociado con la producción de vidrio para recipientes es que se trata de un proceso a alta temperatura y con un uso intensivo de energía. Esto produce la emisión de productos de combustión y la oxidación a alta temperatura del nitrógeno atmosférico, con lo que se genera dióxido de azufre, dióxido de carbono y óxidos de nitrógeno. Las emisiones de los hornos contienen asimismo polvo (derivado de la volatilización y condensación subsiguiente de las materias primas volátiles de la mezcla) y trazas de cloruros, fluoruros y metales presentes como impurezas en las materias primas y en los combustibles fósiles utilizados. Existen soluciones técnicas para minimizar todas estas emisiones, pero cada técnica lleva asociadas implicaciones económicas y medioambientales.

Los niveles de residuos dentro del sector son muy bajos. De hecho, un desarrollo significativo dentro del sector ha sido el uso creciente de vidrio reciclado. El porcentaje medio de utilización de residuos de consumo dentro del Sector del Vidrio para envases en la UE es de aproximadamente el 50% del aporte total de materias primas, y algunas instalaciones utilizan hasta un 90% de vidrio de desecho. Una clara ventaja del vidrio con respecto a los materiales de envase alternativos es la facilidad de reutilización y reciclaje. En general, la producción de envases de vidrio no debe presentar problemas significativos de contaminación del agua. El agua se utiliza principalmente para limpieza y enfriamiento y puede tratarse o reutilizarse fácilmente.

Se han realizado importantes mejoras medioambientales dentro del sector, con importantes reducciones en las emisiones de los hornos y en el uso energético. En particular, se han realizado avances en las técnicas de reducción de emisiones primarias de óxidos de nitrógeno y dióxido de azufre.

1.4. Vidrio Plano

1.4.1. Visión General del Sector

[tm18 CPIV]

El vidrio plano es el segundo mayor sector de la Industria del Vidrio de la UE, y representa alrede-

dor del 22% de la producción total de vidrio. El sector cubre la producción de vidrio flotado y de vidrio laminado. En 1997, el sector produjo aproximadamente 6,9 millones de toneladas de vidrio de las 40 líneas de flotado que operan en la UE. Hay cinco fabricantes de vidrio flotado y cuatro de vidrio laminado que operan en la UE. El vidrio plano se produce en once Estados Miembros, siendo las excepciones Austria, Dinamarca, Grecia e Irlanda.

El sector emplea directamente 12.500 personas en la fabricación del vidrio, y otras 90.000 están empleadas en el proceso del vidrio para obtener productos para construcción y automoción. La producción de vidrio plano aumentó sustancialmente entre 1986 y 1997 (ver Figura 1.1), reforzada en parte por la entrada de Suecia y Finlandia en la UE en 1995. No obstante, de un año a otro la demanda puede fluctuar considerablemente. Por ejemplo, en 1997 se registró un crecimiento particularmente elevado de más del 6%, pero el crecimiento anual previsto entre 1998 y 2000 era del 2 – 3%.

La fabricación de vidrio plano es un negocio a escala mundial dominado por cinco grandes grupos; en orden de ventas mundiales, son Asahi (Japón), Pilkington (Reino Unido), Saint-Gobain (Francia), PPG Industries (EE.UU.), y Guardian Industries (EE.UU.). La producción de la UE está dominada por Pilkington y Saint-Gobain, que juntas se estima que detentan más del 70% del mercado. Hasta hace poco, los cinco grandes grupos disponían de centros de producción en la UE. PPG ha vendido sus plantas europeas de vidrio flotado (2 en Italia y 2 en Francia) a la empresa belga Glaverbel, de la que es accionista mayoritario Asahi. Las operaciones de los productores de vidrio flotado de la UE se resumen en la Tabla 1.5. En la UE se construirán cuatro nuevas líneas de flotado entre 1998 y 2000, una en cada uno de los siguientes países: Alemania, Reino Unido, Italia y España. Las cuatro líneas tendrán una producción del orden de 450 a 600 toneladas diarias.

Empresa	Número de Líneas	Situación
Saint-Gobain	13	Alemania (4), Francia (3), Bélgica (2), España (2), Italia (1), Portugal (1).
Pilkington	12	Alemania (4), Reino Unido (3), Italia (3), Finlandia (1), Suecia (1)
Glaverbel	9	Bélgica (4), Francia (2), Italia (2), Holanda (1)
Guardian	5	Luxemburgo (2), España (2), Alemania (1)
Euroglas	1	Francia (1)

Tabla 1.5: Situación de las líneas de flotado en la UE en 1997

Estado Miembro	Número de Líneas de Flotado	% de la Producción de la UE
Alemania	9	20
Francia	6	15
Italia	6	15
Bélgica	6	15
Reino Unido	3	10
España	4	10
Finlandia	1	
Holanda	1	
Luxemburgo	2	
Portugal	1	
Suecia	1	
Austria	-	
Dinamarca	-	
Grecia	-	<1
Irlanda	-	
Total	40	6.893.000 t en 1997

Tabla 1.6: Número de líneas de flotado en los Estados Miembros en 1997

Rango de Capacidad (toneladas/día)	<400	400 a 550	550 a 700	>700
% de capacidad en cada rango en la UE	3	31	38	28
% de capacidad en cada rango a nivel mundial	17	47	20	16

Tabla 1.7: Porcentaje de capacidad de flotación en los rangos especificados

1.4.2. Productos y Mercados [tm18 CPIV, CPIV stats]

En la UE se producen dos tipos de vidrio plano: vidrio laminado y vidrio flotado. Aunque estrictamente hay otros tipos de vidrio plano, no se tienen en cuenta dentro de este sector, bien porque se cubren en el Sector de Vidrio Especial, bien porque no cumplen el criterio de producción de 20 toneladas diarias especificado en la Directiva 96/61/CE. La mayoría del vidrio laminado es grabado o con hilos metálicos, y representa alrededor del 5% de la producción total del sector. El vidrio grabado se utiliza para invernaderos de horticultura, con fines decorativos y en aplicaciones en las que se dispersa la luz, como tabiques de vidrio y ventanas de baño. El vidrio flotado representa el otro 95% de la producción y se utiliza principalmente en los sectores de construcción y automoción.

Antes de la invención del proceso del vidrio flotado en 1962 por Pilkington, había dos tipos de vidrios no grabados, vidrio en hojas y vidrio “en lunas”. El método más ampliamente utilizado para producir vidrio en hojas era el proceso Pittsburgh, que consiste en estirar el vidrio verticalmente desde el pozo del horno. Se coloca un dispositivo refractario de guía en el vidrio en el lugar de estirado, y unas pinzas refrigeradas recogen el vidrio. El vidrio pasa a través de una cuba de recocido de unos 12 metros de largo y luego es cortado a medida. Antes del vidrio flotado, el vidrio “en lunas” era el vidrio de mayor calidad disponible. El vidrio “en lunas” se produce a partir de vidrio laminado o vidrio en hoja grueso, pulimentando y puliendo el vidrio mediante discos rotatorios en mesas o transportadores grandes. El proceso doble pule el vidrio por ambas caras simultáneamente. El proceso de esmerilado y pulido genera grandes cantidades de residuos.

Las ventajas del proceso de flotación (economía, gama de productos, bajo nivel de residuos y calidad) son tales que, desde su introducción en 1962, los vidrios en hoja y “en luna” han sido sustituidos gradualmente y ya no se producen en la UE. Algunos productos de vidrio laminado son todavía pulidos para aplicaciones especiales, y en algunas partes del mundo todavía se producen cantidades cada vez menores de vidrio en hoja y “en luna”. A los efectos de este documento, las fabricaciones de vidrio en hoja y de vidrio “en luna” pueden considerarse como técnicas esencialmente obsoletas.

Los mercados más importantes para el vidrio flotado son los sectores de construcción y automoción. El mayor de estos mercados es el sector de la construcción, que representa un 75 – 85% de la producción, y la mayor parte del 15 – 25% restante se procesa en vidrios manufacturados para el sector de automoción. Algunos vidrios se cortan simplemente a medida y se utilizan directamente, pero la mayor parte de la producción de vidrio plano se procesa para obtener otros productos. Para la industria de la automoción, éstos son parabrisas laminados, vidrios templados para las ventanas laterales, traseras y techos solares. El principal producto procesado para el sector de la construcción son los vidrios manufacturados aislantes en forma de piezas templadas o laminadas dobles o triples, frecuentemente uno de estos vidrios con una capa de recubrimiento. Estas piezas manufacturadas representan el 40 – 50% del mercado de la construcción, mientras que el resto está compuesto por productos plateados, capas, templados y laminados, cada uno de ellos con un 10 – 15%.

1.4.3. Consideraciones Comerciales y Económicas

[tm18 CPIV, CPIV stats]

En promedio, el comercio total fuera de la UE representa alrededor del 20% de la producción de la UE, con una balanza comercial ligeramente positiva. Aproximadamente el 10% de la producción se exporta a países fuera de la UE, y una cifra similar aunque generalmente inferior se importa al mercado de la UE, predominantemente de Europa del Este. Este resumen es verdadero tanto para vidrio no procesado como procesado. El vidrio plano es caro de transportar, y es preferible servir a clientes que estén lo más cerca posible del centro de fabricación. No obstante, con sólo 40 líneas de flotación en la UE y una intensa competencia entre empresas, las distancias a las que se transporta el vidrio pueden ser considerables, aunque en último término están limitadas por los costes. La gran mayoría del vidrio fabricado y procesado en la UE se vende en Europa Occidental.

La producción de vidrio plano básico es un negocio maduro y cíclico. Entre 1986 y 1997, el sector mostró un crecimiento sustancial aunque a veces irregular, y se espera que el crecimiento anual sea del 2 – 3% entre 1998 y 2000. No obstante, el exceso de capacidad del sector ha conducido a una fuerte presión sobre los precios, lo que ha provocado que los precios cayeran en términos reales entre 1992 y 1997. Los precios pueden fluctuar de un mercado a otro pero han sido particularmente malos en Alemania, el mayor productor. La demanda de vidrio plano es particularmente sensible a los ciclos económicos, ya que depende fuertemente de los sectores de la construcción y la automoción. Durante los períodos de crecimiento económico y elevada demanda, el vidrio plano puede ser un negocio bastante próspero, mientras que durante las fases de empeoramiento de la situación económica o recesión puede ser lo contrario.

La utilización de la capacidad ha pasado del 79% al 92% entre 1987 y 1997, y entre 1990 y 1997 no aumentó mucho por encima del 86%. La opinión general dentro de la industria es que la rentabilidad a largo plazo requiere una utilización de la capacidad por encima del 90%. Con el débil crecimiento predicho no se espera que se reduzca el excedente de capacidad a corto plazo, y la situación se ve agravada por el exceso de capacidad en Europa del Este. La fabricación de vidrio plano y de vidrio flotado en particular es una actividad que precisa grandes inversiones de capital y requiere recursos financieros sustanciales, inversión a largo plazo y un elevado nivel técnico. De ahí el reducido número y gran tamaño de los fabricantes internacionales. Aunque hay fabricantes menores, no son frecuentes.

Los hornos de vidrio plano operan continuamente entre 8 y 12 años, periodo tras el cual son remodelados o reconstruidos con sustitución total o parcial de la estructura según su estado. Una reconstrucción importante tiene un coste de 30 – 50 millones de euros, y una línea de flotación nueva (normalmente de 500 toneladas al día) tiene un coste del orden de 100 millones de euros.

1.4.4. Principales Aspectos Medioambientales

El principal aspecto medioambiental asociado con la producción de vidrio plano es que se trata de un proceso a alta temperatura con un uso intensivo de energía. Esto produce la emisión de productos de combustión, y la oxidación a alta temperatura del nitrógeno atmosférico, lo que genera dióxido de azufre, dióxido de carbono y óxidos de nitrógeno. Las emisiones de los hornos pueden también contener polvo (derivado de la volatilización y condensación subsiguiente de los compuestos volátiles de la mezcla) y trazas de cloruros, fluoruros y metales presentes como impurezas en las materias primas y los combustibles fósiles utilizados. Existen soluciones técnicas para minimizar todas estas emisiones, pero cada técnica lleva asociadas implicaciones económicas y medioambientales.

El vidrio residual generado in situ se recicla al horno, y el sector ha realizado mejoras considerables en el reciclaje de los desechos de proceso y de consumo. Los desechos de vidrio plano son una materia prima útil para otras partes de la industria del vidrio, en particular el Sector de Vidrio para envases, y se estima que hasta un 95% del vidrio de desecho de proceso se recicla en algún modo. En general, la producción de vidrio plano no debe presentar problemas significativos de contaminación del agua. El agua se utiliza principalmente para limpieza y enfriamiento y puede tratarse o reutilizarse fácilmente.

Se han realizado importantes mejoras medioambientales dentro de la producción de vidrio plano, con sustanciales reducciones en las emisiones de los hornos y en particular importantes reducciones en el consumo energético. En 1995, el consumo energético medio por tonelada de vidrio fundido era más de un 30% inferior al de 1975, y alrededor de un 60% menor de lo que lo hubiera sido en 1960. Los niveles de consumo energético para la fusión se acercan a los mínimos teóricos.

A la hora de considerar el impacto medioambiental global del Sector del Vidrio Plano, es útil considerar algunos de los beneficios medioambientales asociados con los productos. Por ejemplo, la energía total asociada con el vidrio incluye tanto la energía consumida en su fabricación como su impacto sobre la energía consumida por el recinto durante el periodo en que está instalado (digamos treinta años). En caso del doble acristalamiento con vidrios de baja emisividad, las pérdidas de calor se reducen a menos del 20% de las del vidrio simple, y a menos del 40% de las del vidrio doble normal. Esto puede tener un impacto significativo sobre el uso de la energía en los recintos. Los productos avanzados para el mercado de la automoción ayudan a reducir el consumo de combustible al ahorrar peso, y a reducir el consumo de los sistemas de aire acondicionado mediante el uso de vidrios de control solar.

El sector de la construcción representa al menos un 40% del consumo de energía de la UE, la mitad del cual se utiliza en la calefacción de las viviendas. Alrededor del 60% de los hogares de la UE tienen todavía vidrio simple. La energía ahorrada mediante su modernización con vidrios de doble acristalamiento de baja emisividad supondría una reducción de 80 millones de toneladas de CO₂ anualmente. Durante la vida útil del vidrio, la reducción en las emisiones de CO₂ alcanzada mediante el uso de vidrio recubierta de baja emisividad compensaría las emisiones generadas en la aplicación del recubrimiento en la fábrica en un factor de 1000:1.

1.5. Fibra de Vidrio de Filamentos Continuos

1.5.1. Visión General del Sector [tm18 CPIV, CPIV stats]

La producción de filamentos continuos de vidrio es uno de los sectores más pequeños de la Industria del Vidrio en cuanto a tonelaje, pero los productos tienen un valor relativamente alto en relación a su masa. Este sector se ocupa de la fabricación de filamentos de vidrio continuos, que se transforman en otros productos. Es distinto de la fabricación de aislamientos de lana de vidrio, que se realiza mediante un proceso distinto. En 1997 el sector produjo 475.000 toneladas de fibra en los 26 hornos que operan en los 12 centros existentes en la UE. En 1996, el sector daba empleo directo a 6.750 personas.

El sector registró un buen crecimiento desde 1986 hasta 1995, en que la producción registró un máximo de 488000 toneladas, y luego se redujo marginalmente en 1996 y luego de nuevo un 2,5% en 1996. Hay cinco productores en la UE, Ahlstrom, Bayer, Owens Corning, PPG Industries, y Vetrotex. El mayor de ellos es Vetrotex, que es una filial de Saint-Gobain y tiene plantas en Francia, Alemania, Italia y España. Los siguientes mayores productores en la UE son Owens Corning, con plantas en Bélgica, Francia, Reino Unido y Noruega, y PPG, con plantas en Holanda y Reino Unido.

A escala mundial, EE.UU. es el mayor productor con más del 40% de la producción mundial, mientras que Europa y Asia representan cada una de un 20 a un 25%. El mayor productor mundial es Owens Corning, seguido de Vetrotex y PPG. La distribución geográfica del sector y el rango de tamaños de los hornos se muestra en las Tablas 1.8 y 1.9.

Estado Miembro	Número de Instalaciones	Número de hornos (en operación en 1997)	% de la Producción de la UE
Europa del Norte	5	10	43
Alemania	1	1	
Finlandia	1	3	
Holanda	1	2	
Reino Unido	2	4	
Europa Central y del Sur	7	16	57
Francia	2	4	
Bélgica	2	7	
Italia	2	3	
España	1	2	
Total	12	26	475.000 t. en 1997

Tabla 1.8: Número de instalaciones y hornos de filamentos continuos en los Estados Miembros

Rango de producción (Toneladas/día)	<27	27 – 55	55 – 82	>82
Número de hornos en cada rango (1997)	6	7	9	4

Tabla 1.9: Número de hornos de filamentos continuos en los rangos de producción especificados

1.5.2. Productos y Mercados

[tm18 CPIV, CPIV stats]

El filamento continuo de vidrio se produce y suministra en diversidad de formas: torsionado, manta, hebra cortada, hilo textil, tejido y fibra molida. El principal uso final (aproximadamente 75%) es el refuerzo de materiales compuestos, principalmente resinas de termoendurecido, aunque también termoplásticos. Los compuestos se utilizan en una amplia variedad de aplicaciones industriales dentro de la UE, y continuamente se desarrollan nuevas aplicaciones.

Los principales mercados para los materiales compuestos son el sector de la construcción, los sectores de automoción y transporte, y la industria eléctrica y electrónica. Otros usos son en tubos y depósitos, equipo de agricultura, maquinaria industrial, y en los sectores de deportes, tiempo libre y marino. La segunda aplicación más importante es la fabricación de materiales textiles que se utilizan en mercados similares a los compuestos, aunque para aplicaciones claramente distintas. El principal mercado para los materiales textiles de vidrio es la industria electrónica, donde se utilizan en la producción de placas de circuito impreso.

El sector tiene una base de clientes amplia y cada vez más diversa, con un sustancial comercio internacional. Esto significa que no es tan vulnerable como otros sectores de la Industria del Vidrio a los problemas económicos en mercados específicos o regiones geográficas. No obstante, alrededor del 50% de la producción del sector va a parar a los sectores de la construcción y automoción / transporte.

1.5.3. Consideraciones Comerciales y Económicas [tm18 CPIV, CPIV stats]

El Sector de Fibra de Vidrio de Filamentos Continuos presenta un buen crecimiento a largo plazo. Sus productos tienen un valor relativamente elevado, se transportan fácilmente y hay un comercio internacional considerable. Aunque la demanda de los productos va en aumento, hay una competencia muy fuerte que crea presión sobre los precios y limita la rentabilidad. La utilización de la capacidad fue en promedio de alrededor del 95% entre 1994 y 1997, pero tuvo una media de tan sólo un 75% entre 1990 y 1993.

En 1996, las exportaciones e importaciones representaron un 27% y un 30% de la producción de la UE respectivamente, lo que supone una balanza comercial ligeramente negativa. Algunos años anteriores

registraron una mayor penetración de las importaciones, con la mayoría de importaciones procedentes de Europa del Este y Norteamérica. La fabricación de filamentos de vidrio es una actividad que precisa grandes inversiones de capital y requiere recursos financieros sustanciales, inversión a largo plazo y un elevado nivel técnico. De ahí el reducido número y gran tamaño de los fabricantes internacionales; aunque hay fabricantes menores, no son frecuentes.

Los hornos de este sector operan ininterrumpidamente entre 8 y 12 años, periodo tras el cual son ampliados o reconstruidos con sustitución total o parcial de la estructura según su estado. Una reconstrucción de un horno de tamaño medio (alrededor de 75 toneladas diarias) tiene un coste del orden de 8 millones de euros. Una planta nueva tendría un coste del orden de 75 a 90 millones de euros, incluidas infraestructuras y servicios.

1.5.4. Principales Aspectos Medioambientales

La producción de fibra de vidrio de filamentos continuos es una actividad que relativamente tiene un bajo nivel de residuos en comparación con muchas actividades industriales. No obstante, la producción de fibras finas puede causar roturas, que a su vez conducen a un mayor nivel de residuos por tonelada de producto que la media de la Industria del Vidrio. En el momento presente se recicla un porcentaje bajo de estos residuos en el proceso, pero se han desarrollado algunas opciones alternativas como subproducto a su disposición en vertedero.

En general la producción de filamento de vidrio no debe presentar problemas importantes de contaminación del agua. El agua se utiliza principalmente para limpieza y enfriamiento, pero hay emisiones potenciales asociadas con el uso de materiales de recubrimiento. Pueden registrarse emisiones de la preparación y manipulación de ensimajes, de la molienda del bobinado, y de operaciones secundarias de proceso. Las emisiones pueden minimizarse mediante las técnicas apropiadas de manipulación y contención de vertidos, y los niveles residuales de contaminación pueden tratarse mediante técnicas estándar.

El principal aspecto medioambiental asociado con la producción de filamento de vidrio es que se trata de un proceso a alta temperatura con un uso intensivo de energía. Esto produce la emisión de productos de combustión, y la oxidación a alta temperatura del nitrógeno atmosférico, lo que genera dióxido de azufre, dióxido de carbono y óxidos de nitrógeno. Las emisiones de los hornos pueden también contener polvo (derivado de la volatilización y condensación subsiguiente de los compuestos volátiles de la mezcla) y trazas de cloruros, fluoruros y metales presentes como impurezas en las materias primas.

Debido a la naturaleza del proceso de fibrado, en ocasiones en la mezcla se utilizan niveles variables de fluoruros en la mezcla, lo que puede dar origen a emisiones de fluoruro de hidrógeno. Se trata de un tema complejo que se discute en detalle en el Capítulo 4. Existen soluciones técnicas para minimizar todas estas emisiones, pero cada técnica lleva asociadas implicaciones económicas y medioambientales. Se han realizado importantes mejoras medioambientales en la producción de filamento continuo de vidrio, las emisiones se han reducido sustancialmente y se han conseguido también reducciones en el consumo de energía.

A la hora de considerar el impacto medioambiental global resulta útil considerar algunos de los beneficios medioambientales asociados con los materiales compuestos, que son la principal aplicación de los filamentos continuos de vidrio. Además de sus numerosas ventajas técnicas, los materiales compuestos consumen por lo general mucha menos energía en su producción que los materiales a los que sustituyen, particularmente acero y aluminio. Permiten una reducción de peso en las aplicaciones de transporte (lo que contribuye a ahorrar combustible) y tienen una vida útil más larga debido a su resistencia a la corrosión.

1.6. Vidrio Doméstico

1.6.1. Visión General del Sector

[tm27 Domestic]

El Sector del Vidrio Doméstico es uno de los sectores más pequeños de la Industria del Vidrio, con aproximadamente un 4% de la producción. Este sector cubre la producción de vajillas, piezas de cocina y elementos decorativos de vidrio, lo que incluye vasos, copas, boles, bandejas, piezas de cocina, vasijas y ornamentos. La fabricación de vidrio doméstico está muy ampliamente distribuida por la UE con unas 140 instalaciones. Aproximadamente 40 de ellas cumplen los criterios de producción de 20 toneladas diarias especificado por la Directiva 96/61/CE, y éstas representan la mayoría de la producción de la UE. La producción total estuvo ligeramente por encima de 1 millón de toneladas en 1997, y alrededor de 90000 personas son empleadas directamente por el sector. El crecimiento en la producción de la UE entre 1986 y 1997 fue bastante bajo, registrándose incluso descensos en la producción en algunos años.

Los principales fabricantes de vidrio doméstico en Europa son Bormioli-Rocco e Figlio (Italia), Calp (Italia), Schott (Alemania), Durobor-Ravenhead (Bélgica y Reino Unido), Edinburgh Crystal (Reino Unido), Nachtmann (Alemania), Verrerie Cristallerie d'Arques VCA (Francia), y Waterford Crystal (Irlanda). Como ya se ha dicho, hay empresas más pequeñas, que a menudo se especializan en productos con mayor valor añadido (vidrio al plomo, etc.).

La distribución geográfica del sector y el rango de tamaños de las instalaciones se muestran en las Tablas 1.10 y 1.11.

Estado Miembro	Número de Instalaciones	% de la Producción de la UE
Francia	15	44,5
Italia	14	17,5
Reino Unido	16	10,7
Alemania	35	9,8
Portugal	17	2,4
Grecia	1	1,3
Austria	6	1,3
España	se desconoce	
Bélgica	2	
Dinamarca	1	
Irlanda	>4	11,8
Holanda	1	
Suecia	15	0,7
Finlandia	>4	
Total	>131	1.045.694 t. en 1997

Tabla 1.10: Número y distribución de las instalaciones de vidrio doméstico en los Estados Miembros en 1997

Rango de Producción (Toneladas / día)	<20	20 – 50	50 – 100	100 – 200	>200
Número de Instalaciones en cada Rango	>90	20	14	5	2

Tabla 1.11: Número de instalaciones de vidrio doméstico en los rangos de producción especificados (estimación)

1.6.2. Productos y Mercados

[tm27 Domestic]

El Sector de Vidrio Doméstico es muy diverso en sus productos y los procesos utilizados. Los productos van desde productos de consumo en masa hasta licoreras y copas de vidrio al plomo de alto valor.

Los métodos de moldeo de los productos van desde los manuales (tubos de soplado y corte) a máquinas totalmente automatizadas. Los productos básicos se han detallado en la sección anterior. Los vasos corrientes representan más del 50% de la producción.

La mayoría de productos están fabricados con vidrio sodocálcico, que puede ser incoloro o coloreado. Las formulaciones de vidrio al plomo y vidrio de cristal se utilizan para producir vidrios, licoreras y elementos decorativos de alto brillo y densidad. El cristal opalino se utiliza para producir copas, bandejas, fuentes y piezas para horno. El vidrio doméstico de borosilicato es quizás más conocido por algunas de las marcas comerciales comunes, como Arcuisine (VCA), Duran (Schott) y Pyrex (Newell), y los productos principales son piezas de cocina y vajillas resistentes al calor. En algunos casos, los productos fabricados con estas distintas formulaciones de vidrio se templan para aumentar su resistencia a los choques mecánicos y térmicos. Los productos de cerámica de vidrio se utilizan para aplicaciones a alta temperatura, principalmente piezas de cocina, y puede soportar choques térmicos de alto nivel.

La base de consumidores finales es evidentemente muy amplia, pero las ventas intermedias se realizan por lo general a grandes minoristas y mayoristas, aunque algunos productores venden también directamente al público. Distintas partes del mercado están afectadas por una amplia gama de factores. Las preferencias de los clientes y las tendencias sociales tienen gran importancia. Por ejemplo, la tendencia a comidas más informales en Europa ha producido una mayor demanda de artículos baratos de calidad media, mientras que la demanda de vidrio coloreado varía con el tiempo y según las regiones. Es importante para el fabricante anticiparse a estos cambios y responder a los mismos; por consiguiente, la flexibilidad es una parte importante del proceso de fabricación.

Debido a ello, las formulaciones de vidrio doméstico deben adaptarse a requisitos específicos de producción y proceso. Incluso las formulaciones más simples sodocálcico pueden presentar importantes diferencias con respecto a otras formulaciones sodocálcico de vidrio para envases o de vidrio plano.

La creciente mecanización en la producción de vidrio al plomo ha llevado a la producción de artículos más baratos con una calidad similar a la de los artículos fabricados a mano. No obstante, este tipo de producto de alto valor es particularmente sensible a la percepción del cliente, y la etiqueta de fabricación a mano todavía impone un elevado precio. Esto significa que es improbable que los artículos fabricados a mano queden reducidos (al menos a medio plazo) a la categoría de productos por encargo.

1.6.3. Consideraciones Comerciales y Económicas

[tm27 Domestic]

Al igual que la mayoría de sectores de la Industria del Vidrio, el Sector del Vidrio Doméstico es un negocio establecido y maduro que experimenta un modesto crecimiento a largo plazo de la demanda. Los productos de vidrio doméstico se transportan fácilmente y existe un sustancial volumen de comercio internacional entre Estados Miembros y extracomunitario. La principal amenaza para este sector es la competencia en los mercados nacionales por parte del creciente volumen de importaciones, y la mayor competencia en los mercados de exportación importantes. Esta mayor competencia ha producido una fuerte presión sobre los precios y por consiguiente ha restringido la rentabilidad. En 1996 las exportaciones e importaciones representaron el 34% y el 17% respectivamente de la producción de la UE, en términos de valor. Aunque esto representa un buen balance comercial global, la mayoría de importaciones fueron de Turquía y de Europa del Este, y superaban en gran medida las exportaciones de la UE a dichas regiones.

Al igual que en otros sectores de la industria, la fabricación de vidrio a gran escala es un proceso que requiere elevadas inversiones de capital e importantes inversiones a largo plazo. Esto se refleja en el pequeño porcentaje de fabricantes de vidrio doméstico que producen más de 20 toneladas diarias. Aunque estas pocas empresas producen la mayoría de la producción de la UE, el Sector del Vidrio Doméstico es atípico en el sentido de que hay gran número de instalaciones menores, con menores requisitos de inversión, que se especializan en artículos fabricados a mano de alto valor o en mercados específicos. Estas pequeñas cantidades de vidrio pueden producirse en hornos de crisoles y hornos diarios, que son relativamente baratos

de construir y operar, aunque nunca pueden competir económicamente en los mercados de gran volumen.

El Sector del Vidrio Doméstico utiliza una amplia gama de tamaños y tipos de hornos, y el intervalo de reparación del horno varía en función de ello. Los grandes hornos de combustible fósil pueden funcionar durante un periodo de 5 a 8 años antes de que sea necesaria una reparación importante, para los hornos eléctricos el periodo es de 3 a 6 años, y para los hornos de crisoles de 10 a 20 años, siendo sustituidos los crisoles con una frecuencia entre 3 y 12 meses. Para un horno típico de vidrio al plomo calentado eléctricamente y con una producción de 30 toneladas al día, una reparación importante (excluidas máquinas de moldeo) tendría un coste del orden de 2 millones de euros, y un horno nuevo de 8 millones de euros. Para un horno típico de vidrio sodocálcico con combustible fósil y una producción de 130 toneladas diarias, una reparación importante (excluidas máquinas de moldeo) tendría un coste del orden de 4 millones de euros, y un horno nuevo de 12 millones de euros.

1.6.4. Principales Aspectos Medioambientales

En general, las materias primas para la producción de vidrio doméstico son sustancias naturales o sintéticas relativamente inocuas. La excepción a esta norma es la producción de vidrio al plomo o de vidrio de cristal, que comportan el uso de óxido de plomo y en ocasiones trióxido de antimonio o arsénico, que precisan una manipulación y almacenamiento cuidadosos para prevenir las emisiones. El sector produce niveles relativamente bajos de residuos, y la mayoría del vidrio de desecho es normalmente recuperado o reciclado por el Sector de Vidrio para envases (excepto el vidrio al plomo y el vidrio de cristal), cuando las restricciones de calidad lo permiten. Las consideraciones de calidad impiden por lo general el uso de vidrio de desecho en el proceso.

La mayoría de tipos de producción de vidrio doméstico no presentan importantes problemas de contaminación del agua. El agua se utiliza ampliamente para limpieza y enfriamiento, y puede ser fácilmente reciclada o tratada. No obstante, el uso de compuestos más tóxicos en la producción de vidrio al plomo o de vidrio de cristal supone un mayor potencial de contaminación. Las emisiones pueden minimizarse y tratar los niveles residuales de contaminación mediante técnicas estándar.

El principal aspecto medioambiental asociado con la producción de vidrio doméstico es que se trata de un proceso a alta temperatura con un uso intensivo de energía. Para hornos de combustibles fósiles, esto produce la emisión de productos de combustión, y la oxidación a alta temperatura del nitrógeno atmosférico, por lo que se genera dióxido de azufre, dióxido de carbono y óxidos de nitrógeno. Las emisiones de los hornos contienen asimismo polvo y trazas de cloruros, fluoruros y metales presentes en las materias primas. Los vidrios opacos requieren el uso de materias primas que contienen fluoruros, lo que puede dar origen a emisiones de fluoruro de hidrógeno. Cuando se realiza el pulido al ácido es necesario considerar aspectos asociados de contaminación del aire, del agua y de producción de residuos.

Existen soluciones técnicas para minimizar todas estas emisiones, pero cada técnica lleva asociadas implicaciones económicas y medioambientales. En años recientes se han realizado mejoras medioambientales, con reducciones significativas de las emisiones y del consumo de energía.

1.7. Vidrio Especial

1.7.1. Visión General del Sector

[tm25 Special, CPIV stats]

El Sector de Vidrio Especial produce alrededor del 6% de la producción total de la Industria del Vidrio, y en términos de tonelaje es el cuarto sector más importante. Los productos de vidrio especial tienen un valor relativamente elevado. El valor bruto de la producción en 1996 se aproximaba a los 3000 millones de euros, alrededor de la mitad del mayor sector, que es el Vidrio para envases. En 1997, incluyendo la producción de vidrio soluble, el sector produjo 1,46 millones de toneladas de productos y dio empleo directo a unas 35000 personas.

Se trata de un sector extremadamente diverso que cubre una amplia gama de productos, pero los principales productos son: vidrio para tubos de rayos catódicos (CRT) para televisores y monitores; vidrio para iluminación (tubos y bombillas); vidrio óptico; material de vidrio para laboratorio y uso técnico; vidrios de borosilicato y cerámicos (material de cocina y aplicaciones domésticas a alta temperatura); y vidrio para la industria electrónica (Ej. pantallas LCD). Hay un cierto grado de superposición entre el Sector de Vidrios Especial y otros sectores de la Industria del Vidrio, particularmente el Sector de Vidrio Doméstico para algunos productos de borosilicato y de cerámica de vidrio. Esto no se considera un aspecto significativo, ya que estos productos representan sólo una parte minoritaria de la producción del sector.

La mayoría de pequeños productores de los productos especializados de bajo volumen como vidrio óptico y vidrio para la industria electrónica no llegan al nivel de producción de 20 toneladas diarias especificado en la Directiva 96/61/CE. De las plantas que producen vidrio para tubos de rayos catódicos, vidrio para iluminación, vidrio de borosilicato y cerámicas de vidrio, la mayoría están por encima de este umbral. Hay algunas instalaciones integrales que producen una amplia gama de volúmenes de pequeño y gran volumen, y en estos casos la producción total puede estar por encima de este nivel.

Aunque normalmente se considera parte de la industria química, el vidrio soluble (silicato sódico) puede producirse fundiendo arena y carbonato sódico. Esta actividad encaja en las definiciones de las Secciones 3.3 y 3.4 del Anexo 1 de la Directiva 96/61/CE. A los efectos del presente documento, esta actividad se ha considerado que cae dentro del Sector de Vidrio Especial, aunque se han hecho distinciones cuando se ha considerado conveniente.

1.7.2. Productos y Mercados

[tm25 Special]

La Tabla 1.12 indica las producciones relativas de cada parte del sector. El vidrio para tubos de rayos catódicos (CRT), y los tubos y bombillas de vidrio representan más del 80% de la capacidad.

Tipo de Vidrio	Producción en 1997 (toneladas)	Capacidad (toneladas / año)	% Capacidad Sector (excl. vidrio soluble)
CRT (panel y embudo)	525.000	880.000	61,2
Tubos y Bombillas de Vidrio	240.000	290.000	20,2
Vidrio de borosilicato (excl. tubos)	60.000	90.000	6,3
Otros Vidrios para Iluminación (excl. cuarzo, tubos y bombillas)	30.000	60.000	4,2
Cerámica de Vidrio	25.000	65.000	4,5
Vidrio de Cuarzo	5.000	15.000	1,0
Vidrio Óptico	6.000	12.000	0,8
Otros Tipos de Vidrio	10.000	25.000	1,8
Total Vidrio Especial	901.000	1.437.000	100
Vidrio Soluble	560.000	600.000	(42 % del Vidrio Especial)
Total Combinado	1.461.000	2.037.000	142

Tabla 1.12: Desglose del Sector de Vidrio Especial

En la UE, el vidrio para tubos de rayos catódicos (CRT) se produce sólo en Alemania, Reino Unido y Francia. La producción está controlada por cinco empresas: Philips (plantas en Alemania y Reino Unido); Schott (Alemania); Samsung-Corning (Alemania); Nippon Electrical Glass (NEG, Reino Unido), y Thomson Videoglass (Francia). En la UE hay 13 hornos en operación, que van desde 70 a 360 toneladas/día, con una capacidad media de 185 toneladas/día. La mayoría de los hornos son hornos regenerativos de llama transversal, aunque también funcionan algunos hornos con combustión de oxi-gas. Estos productos se comercian internacionalmente y los mercados están muy regionalizados. Por ejemplo, en Europa hay un fuerte crecimiento en el número de ordenadores personales y una elevada demanda de monitores; sin embargo, en general, el crecimiento en la producción de televisores es mucho más lento, excepto en países en desarrollo.

La producción de tubos para aplicaciones farmacéuticas y vidrio para iluminación, así como de bombillas para iluminación, está más ampliamente distribuida en la UE, pero la producción es más alta en Alemania, Holanda y Reino Unido. Hay 10 empresas que producen estos tipos de productos, Schott, Osram, y Techn. Glaswerke Ilmenau (Alemania); Philips (Holanda); Demaglass (Reino Unido); Kimble Italiana y Bormioli Rocco E Figlio (Italia); Wheaton Lawson Mardon (Francia); Averti (España); y Glass Componenten Lommel (Bélgica).

Los hornos tienen capacidades de 20 - 200 toneladas/día para vidrios sodocálcicos y de 20 - 50 toneladas/día para vidrios de borosilicato. Los hornos para vidrio sodocálcico son predominantemente hornos regenerativos de llama transversal, y los hornos para borosilicato son en su mayoría hornos calentados eléctricamente con algunos hornos de recuperación. La producción de vidrio para uso en la industria del vidrio está dominada por los fabricantes de los productos de iluminación completos. Otros vidrios para iluminación consisten principalmente en vidrios para lámparas de aplicación en usos técnicos y en automoción, y representan aproximadamente el 4% de la producción de vidrio especial.

La producción de vidrio de borosilicato (excluidos tubos e iluminación) se concentra en Alemania (Schott, Desag, Jenaer y Techn. Glaswerke Ilmenau), en Francia (Verrerie Cristallerie D'Arques) y el Reino Unido (Corning). La capacidad de fusión está entre 20 y 50 toneladas/día, y los hornos son predominantemente calentados eléctricamente, con algunos hornos recuperativos. Entre los productos se incluyen vajillas domésticas, material de laboratorio, vidrio antiincendios para ventanas y puertas y pequeños paneles de vidrio resistentes al calor para puertas de hornos, etc. En este sector, los productos de vidrio cerámico son fabricados principalmente por Schott Glas en Alemania, y Keraglass y Eurokera en Francia. Los principales productos son material de cocina y vajillas resistentes al calor (Ej. Jena 2000 y Pyroflam), y vitrocerámicas para encimeras.

El vidrio soluble se produce en Alemania (Henkel KG, APS-Akzo, y Woellner Silicat), el Reino Unido (ICI/Crossfield Chemicals), Holanda (Akzo-PQ Silica Vof), Francia (Rhone-Poulenc - Rhodia), Finlandia (Zeofinn Oy) y España (FMC foret). El líder del mercado es Henkel KG. Los hornos están en la gama de <40 - 350 t/día y son principalmente hornos regenerativos o de recuperación con llama transversal, aunque un fabricante utiliza hornos rotatorios. El vidrio soluble se produce asimismo mediante el proceso hidrotérmico, que no cumple las definiciones de las Secciones 3.3 y 3.4 del Anexo I de la Directiva 96/61/CE, y no está cubierto por el presente documento. Aproximadamente de un 20 a un 30% del vidrio soluble producido en la UE se fabrica por el proceso hidrotérmico.

La Tabla 1.13 muestra la distribución de la producción por Estados Miembros, pero estos datos sólo se hallan disponibles para tubos de rayos catódicos y tubos / bombillas de vidrio, que representaron el 85% de la producción en 1997.

Estado Miembro	Vidrio para Tubos de Rayos Catódicos		Tubos / Bombillas de Vidrio	
	Nº Instalaciones	% Producción UE	Nº Instalaciones	% Producción UE
Alemania	3	69	3	40
Reino Unido	2	21	1	15
Francia	1	10	1	Ver Otros
Holanda / Bélgica	-	-	2	32
Otros	-	-	3	13

Tabla 1.13: Distribución de la producción de vidrio especial en la UE.

1.7.3. Consideraciones Comerciales y Económicas

[tm25 Special, CPIV stats]

Los subsectores del vidrio especial van desde negocios establecidos y maduros a otros que sirven a mercados con un alto nivel de desarrollo, con algunas empresas que operan en una amplia gama de mercados. El crecimiento, los beneficios y las perspectivas pueden variar ampliamente para cada parte del sector. Por ejemplo, en 1996 la producción de vidrio para tubos de rayos catódicos para monitores de ordenador

nadores mostró un crecimiento muy elevado en Europa, mientras que la demanda de vidrio óptico en Europa estuvo estancada debido a la competencia de materiales alternativos. El crecimiento global del sector entre 1986 y 1996 fue constante, con un aumento del valor de la producción desde 1,75 a 2,75 miles de millones de euros.

En 1996, las exportaciones de la UE de vidrio especial (excluido vidrio soluble) fueron de 68500 toneladas, mientras que las importaciones fueron de 87500 millones de toneladas, lo que arroja un déficit comercial significativo. El mayor nivel de importaciones (más del 40%) provino de Japón, con niveles menores procedentes de Europa del Este (22%) y EE.UU. (12%).

La fabricación de vidrio a gran escala es una actividad que requiere grandes inversiones de capital, así como sustanciales inversiones a largo plazo y gran capacidad técnica. Esto se refleja en el reducido número de fabricantes de vidrio especial de la UE que producen más de 20 toneladas al día. Aunque estas pocas empresas producen la mayoría de la producción de la UE, el Sector de Vidrio Especial cuenta con gran número de instalaciones más pequeñas, que requieren una menor inversión de capital, que con frecuencia se especializan en productos de alto valor, alta calidad y elevadas especificaciones técnicas.

Estas pequeñas cantidades de vidrio se producen en hornos pequeños, a menudo calentados eléctricamente, y operados durante campañas más cortas. A pesar de su escala, estas operaciones requieren asimismo una inversión sustancial a largo plazo en equipo de alta calidad, personal especializado, y un trabajo extensivo de investigación y desarrollo.

El Sector de Vidrio Especial utiliza una amplia gama de hornos, y el intervalo de reparación de los hornos varía en consecuencia. Los grandes hornos de combustible fósil funcionan durante 6 o 7 años para vidrio especial y de 8 a 12 años para vidrio soluble, antes de que se requiera una reparación importante. Para hornos calentados eléctricamente, el intervalo de reconstrucción es de 3 a 4 años. Debido a la amplia variación dentro del sector, los costes típicos son difíciles de prever, aunque el sector ha facilitado los siguientes costes para determinadas producciones a modo de ejemplo.

Producción	Capacidad	Producción	Inversión Total
Vidrio de borosilicato para piezas de cocina, material de laboratorio, etc.	1 horno 35 - 40 t/día	Normalmente, 26 millones unidades/año	25 millones euros
Vidrio para tubos de rayos catódicos, paneles y embudos. Líneas de conformación: 3 para paneles, 2 para embudos	1 cuba de paneles 200 - 300 t/día 1 cuba de embudos 140 - 200 t/día	6 - 10 millones de unidades/año	300 - 400 millones euros
Encimeras vitrocerámicas	2 hornos x 60 t/día	800.000 m ² , 3 millones de unidades	175 millones euros
Tubos de vidrio, fusión y estirado	2 hornos x 30 - 35 t/día	16.000 toneladas – neto	30 millones euros

Tabla 1.14: Costes de inversión para instalaciones de vidrio especial

1.7.4. Principales Consideraciones Medioambientales

La amplia gama y naturaleza especializada de los productos del Sector de Vidrio Especial supone el uso de una gama de materias primas más amplia que la que se encuentra en otros sectores. Por ejemplo, los embudos de los tubos de rayos catódicos tienen un contenido de óxido de plomo superior al 20%, lo que es comparable al vidrio al plomo. Determinadas composiciones pueden requerir agentes afinantes especializados como óxidos de arsénico y antimonio, y algunos vidrios ópticos pueden contener hasta un 35% de fluoruro y un 10% de óxido de arsénico.

El sector produce niveles relativamente bajos de residuos, y la mayor parte del vidrio de desecho producido internamente se recicla. Las consideraciones de calidad han restringido el uso de vidrio de desecho externo y de consumo. Se están desarrollando iniciativas para normalizar las formulaciones de vidrio para tubos de rayos catódicos y facilitar el reciclaje de los residuos de vidrio del mercado en el futuro. El

agua se utiliza ampliamente para limpieza y refrigeración, y puede ser fácilmente reciclada o tratada. La producción de vidrio especial puede dar origen a aspectos de contaminación del agua debido a las operaciones de pulido y esmerilado, particularmente con vidrios que contienen plomo. Las emisiones pueden minimizarse mediante técnicas apropiadas de manipulación y contención de vertidos, y los niveles residuales de contaminación pueden tratarse mediante técnicas estándar.

El principal aspecto medioambiental asociado con todos los hornos de combustibles fósiles es que se trata de un proceso a alta temperatura con un uso intensivo de energía. Esto produce la emisión de productos de combustión, y la oxidación a alta temperatura del nitrógeno atmosférico, por lo que se genera dióxido de azufre, dióxido de carbono y óxidos de nitrógeno. Las emisiones de los hornos contienen asimismo polvo y trazas de cloruros, fluoruros y metales presentes en las materias primas. En ocasiones, las formulaciones del vidrio requieren el uso de materias primas que contienen fluoruro, lo que puede dar origen a emisiones de fluoruro de hidrógeno. Cuando se utilizan materias primas tóxicas en la mezcla, existe el potencial de emisiones derivadas de la manipulación, del almacenamiento y del horno, por lo que deben tomarse medidas apropiadas. Existen soluciones técnicas para minimizar todas estas emisiones, pero cada técnica lleva asociadas consideraciones económicas y medioambientales. En años recientes se han realizado mejoras medioambientales, habiéndose reducido significativamente las emisiones y el consumo de energía mediante medidas primarias y secundarias.

1.8. Lana Mineral

1.8.1. Visión General del Sector [tm26 EURIMA, EURIMA stats]

El Sector de la Lana Mineral representa aproximadamente un 6 – 7 % de la producción total de la Industria del Vidrio. El sector cubre la producción de lana de vidrio y de materiales aislantes de lana de roca, que son esencialmente masas de fibras de distintas longitudes entrelazadas aleatoriamente y unidas mediante un aglomerante a base de resina. Aunque en ocasiones se utiliza el término fibra de vidrio para describir la lana de vidrio, los aislantes no deben confundirse con los productos del Sector de Fibra de Vidrio de Filamentos Continuos, que se fabrican mediante procesos distintos y se venden a distintos mercados.

En 1996, el sector dio empleo directo a más de 10000 personas en 48 instalaciones, y produjo 2 millones de toneladas de productos, con un valor de alrededor de 2000 millones de euros. Entre 1986 y 1996, la producción creció sólo lentamente desde 1,4 millones de toneladas a 2 millones de toneladas. La UE está dominada por cinco grandes productores: Saint-Gobain (20 instalaciones en 12 Estados Miembros); Rockwool International (10 instalaciones en 5 Estados Miembros); Partek Insulation (6 instalaciones en 2 Estados Miembros); Pfleiderer (3 instalaciones en 2 Estados Miembros) y Owens Corning (4 instalaciones en 2 Estados Miembros). La mayoría de estas empresas tienen operaciones en países fuera de la UE o en otros sectores. En la UE hay también varios fabricantes independientes. La distribución geográfica del sector y el rango de tamaños de las instalaciones se muestran en las Tablas 1.15 y 1.16.

Estado Miembro	Número de Instalaciones	% de la Producción de 1996
Alemania	9	28,0
Austria	2	3,5
Bélgica	2	4,5
Dinamarca	4	9,0
España	2	3,0
Finlandia	5	7,5
Francia	7	16,0
Grecia	1	Aprox. 0,5
Portugal	1	
Holanda	2	9,5
Italia	2	2,0
Reino Unido e Irlanda	6	9,5
Suecia	5	7,0
Total	48	2.000.000 t.

Tabla 1.15: Número de instalaciones de lana mineral en Estados Miembros

La Tabla 1.16 muestra el número de instalaciones que entran dentro de los rangos de producción especificados en 1996. Algunas de las instalaciones tienen más de un horno. Estas cifras representan la producción real en 1996, y se estima que la mayoría de instalaciones operaban entre un 10 y un 30% por debajo de su capacidad máxima. La producción media por instalación en 1996 fue del orden de 41000 toneladas. Nótese que estas cifras hacen referencia a tonelaje y que, para una aplicación dada, los productos de lana de roca son considerablemente más densos que los productos de lana de vidrio, particularmente en el rango inferior de densidad.

Rango de Producción (Toneladas/día)	<27	27 – 82	82 – 164	164 – 274	>274
Número de Instalaciones en cada rango	5	16	16	9	2

Tabla 1.16: Número de instalaciones de lana mineral en los rangos de producción especificados

1.8.2. Productos y Mercados

[tm26 EURIMA]

La lana mineral de produjo por vez primera en 1864 aplicando un chorro de vapor sobre la escoria fundida que salía de un alto horno. Las patentes comerciales y la producción comenzaron hacia 1870. El mercado comenzó a crecer considerablemente durante la II Guerra Mundial, cuando había demanda de viviendas prefabricadas baratas para sustituir las casas destruidas. En 1943, sólo en EE.UU., se produjeron más de 500.000 toneladas de lana mineral. En la mayoría de países desarrollados, el aislamiento térmico se ha aceptado universalmente y se ha incorporado en casi todas las formas de construcción. Además de sus propiedades térmicas, los aislamientos de lana mineral tienen buenas propiedades acústicas y de protección contra incendios.

Los principales productos son mantas enrolladas de baja densidad, placas de densidad media y alta, lana suelta para soplado y aislamientos para tuberías. Los principales mercados para estos productos son: aislamiento térmico para construcción (paredes, tejados, suelos, etc.); aplicaciones de calefacción, ventilación y aire acondicionado; instalaciones industriales (técnicas) (conductos y recipientes de proceso, plantas químicas, aplicaciones en mar abierto y marítimas); protección contra incendios; acústica (absorción y aislamiento de sonido); medios de cultivo inertes y acondicionamiento del suelo. La lana de vidrio y la lana de roca son intercambiables en muchas aplicaciones, pero algunas aplicaciones demandan un producto con preferencia sobre el otro. La lana de roca se prefiere normalmente para aplicaciones a alta temperatura o de protección contra incendios, y la lana de vidrio se utiliza con mayor frecuencia cuando el peso es el factor crítico.

El mercado más importante para la lana mineral es el sector de la construcción, que absorbe hasta un 70% de la producción y depende en gran medida de la situación económica predominante. Aunque hay algunas excepciones en la UE, en los años 90 el sector de la construcción registró un crecimiento muy lento, con importantes retrocesos periódicos y locales. Otros factores clave que influyen sobre el mercado son: el clima, o las condiciones climáticas; los costes de combustibles, incluidos los impuestos sobre combustibles; la legislación, como los reglamentos de construcción; y las presiones para una mejora medioambiental global (calentamiento global y contaminación).

A pesar de la capacidad técnica necesaria para fabricar fibras aislantes, se trata esencialmente de una mercancía de consumo. Hay pocas diferencias entre los productos que compiten en los mismos mercados, y la competencia se basa esencialmente en el precio. Esto ha conducido a reducciones sustanciales de costes y de tamaño de las empresas dentro del sector. La competencia de precios no es tan fuerte en el mercado de productos “técnicos”, que requiere productos de mayor valor añadido como secciones de tubería rectas para aplicaciones a alta temperatura e ignífugas.

Debido al moderado rango de temperatura requerido, para el sector de la construcción se halla disponible una amplia variedad de materiales aislantes, los más comunes de los cuales son: espumas plásticas (principal competencia); fibra de celulosa (papel de diario triturado); vermiculita y perlita; y espuma de vidrio. Ninguno de estos materiales puede equipararse a la lana mineral en todas sus prestaciones (bajo precio, comportamiento térmico, comportamiento acústico, baja inflamabilidad y facilidad de instalación), pero todos ellos tienen su lugar en el mercado.

1.8.3. Consideraciones Comerciales y Económicas

[tm26 EURIMA, tm8 S2 3.03]

El Sector de la Lana Mineral es un negocio muy maduro que registra un crecimiento lento pero que es crecientemente competitivo. Hay un considerable exceso de capacidad en el mercado pese al cierre de varias plantas, y esto, en combinación con el lento crecimiento, ha producido una fuerte presión sobre los precios. El precio de venta de una tonelada de producto en 1997 era el mismo que en 1987, y por consiguiente considerablemente más bajo en términos reales. Los productos de lana mineral tienen una baja relación entre valor y volumen, lo que limita la distancia a la que pueden transportarse de forma económica. A pesar de ello hay un comercio significativo dentro de la UE, pero el comercio extracomunitario representa menos del 5% de la producción. Obviamente, el comercio extracomunitario es mayor en los Estados Miembros que limitan con países exteriores. Las mayores exportaciones son de Suecia y Finlandia a Polonia, Rusia y los Estados Bálticos, y las importaciones son mayores a Alemania, Austria e Italia desde Hungría, Eslovenia y Croacia.

La producción de lana mineral es una actividad que requiere fuertes inversiones de capital y sustanciales recursos financieros, inversiones a largo plazo y capacidad técnica. Esto crea una considerable barrera contra la entrada en el mercado, por lo que la mayoría de productores son grandes empresas con un largo historial en el negocio. Existe una tendencia en el sector a la adquisición de fabricantes independientes por los grandes grupos a medida que se consolida el sector.

El Sector de Lana Mineral utiliza principalmente hornos de recuperación y eléctricos, y en menor medida hornos con combustión de oxi-gas para la producción de lana de vidrio; y predominantemente cubilotes de viento caliente para producción de lana de roca. En consecuencia, el intervalo de reparación de los hornos es variable. Los hornos de recuperación funcionan ininterrumpidamente durante períodos de 8 a 12 años antes de que se precise una reconstrucción importante, y los hornos eléctricos tienen períodos de 3 a 6 años. Las vidas útiles de los hornos con combustión de oxi-gas no han sido determinadas plenamente, aunque se espera que sean comparables a los hornos de recuperación. Los cubilotes de viento caliente no funcionan continuamente durante períodos tan largos, normalmente funcionan de 1 a 3 semanas entre paradas. En un sector tan maduro, las instalaciones nuevas son muy escasas, pero en 1998 se construyó una planta de lana de vidrio de 20.000 toneladas anuales, que representó una inversión de 45 millones de euros. Una planta de lana de roca con un volumen similar de producción (es decir, unas 400.000 toneladas anuales) representaría una inversión similar. Los costes de las reconstrucciones de los hornos de vidrio son comparables a los indicados para otros sectores.

1.8.4. Principales Aspectos Medioambientales

En común con todas las actividades de fabricación de vidrio, la producción de lana mineral es un proceso a alta temperatura con un uso intensivo de energía. Para los hornos de combustible fósil, esto produce la emisión de productos de combustión y la oxidación a alta temperatura del nitrógeno atmosférico, lo que genera dióxido de azufre, dióxido de carbono y óxidos de nitrógeno. Las emisiones de los hornos contienen asimismo partículas, trazas de cloruros, fluoruros y metales si se hallan presentes como impurezas en las materias primas y combustibles fósiles utilizados.

En este sector existen dos otras importantes fuentes de emisiones, la zona de conformación (en la que se aplica el aglomerante a las fibras) y la estufa de polimerización (donde se seca el producto y se poli-

meriza el aglomerante). Las emisiones de la zona de conformación es probable que contengan niveles significativos de partículas, fenol, formaldehído, amoniaco y agua. Las emisiones de la estufa de polimerización contienen componentes volátiles del aglomerante, productos de descomposición del aglomerante, y productos de combustión de los quemadores de la estufa. Existen soluciones técnicas para minimizar todas estas emisiones y cada técnica lleva asociadas implicaciones económicas y medioambientales a considerar. Se han realizado importantes mejoras medioambientales en la producción de lana mineral, habiéndose reducido sustancialmente las emisiones, con importantes reducciones en el consumo energético.

En general, la producción de aislamientos de lana mineral no debe presentar importantes problemas de contaminación del agua. Los procesos básicos son usuarios netos de agua, principalmente debido a la evaporación de la zona de conformado y del horno de polimerización. Los sistemas de agua de proceso son normalmente en circuito cerrado y se rellenan con agua limpia, pero es necesario tomar precauciones para evitar la contaminación de los sistemas de agua limpia. Las emisiones pueden minimizarse mediante técnicas apropiadas de circulación y antiterrames y las emisiones residuales pueden tratarse mediante las técnicas convencionales.

A la hora de considerar el impacto medioambiental global del sector, es útil considerar algunos de los beneficios medioambientales asociados con los productos. La producción de lana mineral requiere relativamente poca energía en comparación con el ahorro potencial durante el uso de los productos. En menos de un mes tras su instalación, los productos de lana mineral pueden ahorrar la totalidad de la energía utilizada para su fabricación. Al cabo de 50 años de su uso, periodo considerado habitual en edificios, la energía ahorrada puede ser 1.000 veces mayor que la consumida durante la producción. Si se compara con las emisiones típicas de CO₂ de la producción de energía derivada de combustibles fósiles, al cabo de 50 años, un producto puede ahorrar 1.000 veces la cantidad de CO₂ emitida durante su producción. A temperaturas más elevadas, por ejemplo, en tuberías, calderas y plantas de proceso, el ahorro puede ser considerablemente mayor, y la amortización de la inversión puede ser de días en lugar de semanas.

1.9. Fibra Cerámica

1.9.1. Visión General del Sector

[tm40 ECFIA]

Actualmente hay seis plantas en la UE, que dan empleo a unas 800 personas. La producción estimada en 1997 fue de aproximadamente 42.000 toneladas (0,15% del total de la Industria del Vidrio), procedente de forma predominante del Reino Unido y Francia. Sólo hay tres empresas que operen en la UE, Thermal Ceramics (3 instalaciones), Carborundum – parte del Grupo Saint-Gobain - (2 instalaciones), y Rath (1 instalaciones). En este documento sólo se trata la producción de fibras cerámicas mediante la fusión de sustancias minerales. Algunas fibras (Ej. fibras de alúmina cristalina) pueden producirse por medios químicos, pero estas actividades no entran dentro de las definiciones dadas en las Secciones 3.3 o 3.4 del Anexo 1 de la Directiva 96/61/CE.

Estado Miembro	Número de Instalaciones
Alemania	1
Francia	2
Italia	1
Reino Unido	2
Total	6

Tabla 1.17: Distribución de las instalaciones de fibra cerámica en los Estados Miembros

1.9.2. Productos y Mercados

[tm40 ECFIA]

La fibra cerámica es un material vítreo, silíceo y fibroso utilizado principalmente como material ais-

lante a alta temperatura (1000 – 1460 °C). Sus principales usos y sus cuotas de mercado son: revestimientos para hornos y calentadores (50 %); aparatos (20 %); proceso de metales (10 %); aislantes industriales generales (10 %); usos en automoción (5 %); y protección contra incendios (5 %). Las formas principales de los productos son fibra en bruto, plancha (fielro o módulos), cartón, papel, artículos moldeados al vacío, y tejidos. Todas estas formas derivan de la fibra en bruto.

Muchos de los productos se venden a las industrias pesadas tradicionales, como petroleras, petroquímicas siderurgia, cerámica, vidrio, metalurgia no férrea, cemento, etc. Los productos de fibra cerámica son de relativo alto valor y pueden transportarse económicamente a la mayoría de mercados del mundo. Los productos son frecuentemente convertidos o incorporados en otros productos como catalizadores de automoción, juntas, forros de pistones, blindajes térmicos y forros de frenos. Alrededor de un 30 – 40% de productos primarios se utilizan como componentes en aplicaciones secundarias.

1.9.3. Consideraciones Comerciales

[tm40 ECFIA]

El hecho de que actualmente sólo haya tres empresas que produzcan fibra cerámica en la UE es fruto de la consolidación en el sector. La más significativa fue la compra de Carborundum por Saint-Gobain y su fusión con el holding existente Kerlane. Los principales factores que afectan al sector son los costes de producción (energía, materias primas y mano de obra) y la actividad en las industrias clientes. Hay considerables exportaciones desde la UE y las importaciones son relativamente bajas.

El coste estimado de una nueva fábrica de capacidad típica es de 3 a 8 millones de euros. Los hornos son calentados eléctricamente y tienen una vida útil de 3 a 5 años, el coste de los hornos se estima entre 1 y 2 millones de euros.

En el mercado de revestimientos refractarios, las fibras cerámicas compiten directamente con otros materiales refractarios como los ladrillos. En otras aplicaciones, la competencia principal es por parte de la lana mineral, así como una serie de fibras especiales de sílice y de alúmina. Los productos de lana de roca y de lana de vidrio son sustancialmente más baratos que los de fibra cerámica, pero menos duraderos, mientras que los fabricados con fibras especiales se consideran más caros. Debido a las exclusivas propiedades térmicas y físicas de las fibras cerámicas, la amenaza competitiva inmediata de los sustitutos no se considera sustancial.

1.9.4. Principales Aspectos Medioambientales

A diferencia de otros sectores de la Industria del Vidrio, el Sector de Fibra Cerámica utiliza exclusivamente hornos eléctricos, y en consecuencia las emisiones directas del horno son muy bajas y se controlan fácilmente. El principal aspecto medioambiental es la emisión al aire de partículas, que pueden contener fibras. Según las definiciones de la Directiva sobre Sustancias Peligrosas 67/548/CEE la fibra cerámica ha sido clasificada recientemente como un carcinógeno de categoría 2, por lo que las emisiones de fibras en el entorno laboral y al medio ambiente deben ser estrictamente controladas. Por lo general, los niveles de residuos son relativamente bajos, y de las operaciones de proceso secundario pueden derivarse niveles bajos de emisiones acuosas que contienen sólidos en suspensión y algunos compuestos orgánicos. Los niveles de emisiones de fibra cerámica son muy bajos en las instalaciones existentes en la UE, ya que todas ellas están equipadas con equipos de eliminación de polvo cuando es necesario.

1.10. Fritas

1.10.1. Visión General del Sector

[tm46 ANFFECC]

El Sector de Fritas está más frecuentemente asociado con la Industria Cerámica, pero entra dentro

del ámbito de este documento ya que está cubierto por las definiciones de la Sección 3.4 del Anexo 1 de la Directiva 96/61/CE. La producción de la UE se estima en 1 – 1,25 millones de toneladas anuales, lo que hace de las Fritas uno de los sectores más pequeños de la Industria del Vidrio. El número de empleados es difícil de establecer, porque para muchas empresas la producción de fritas es sólo una pequeña parte del negocio. El sector cubre la producción de fritas para barnices y esmaltes, que se utilizan para decorar materiales cerámicos y metálicos.

Se estima que hay alrededor de 60 instalaciones en la UE, principalmente en España e Italia. España es el mayor productor del mundo y produce más de mitad de la producción total de la UE. Italia tiene más instalaciones, pero los volúmenes de producción son menores. Los tres principales productores de la UE son Cerdec, Ferro y Cookson Matthey. Estas tres empresas poseen una serie de compañías operativas, y hay una serie de empresas independientes, como por ejemplo Colorobbia en España.

Estado Miembro	Número de Instalaciones
España	17
Italia	32 (estimación)
Portugal	1
Bélgica	1
Alemania	4
Holanda	1
Reino Unido	4
Total	60 (estimación)

Tabla 1.18: Distribución de las instalaciones de fritas en los Estados Miembros (estimación)

Rango de Producción (Toneladas/día)	<80	80 – 150	>150
Número de Instalaciones en cada Rango	>14	>5	>5

Tabla 1.19: Número de instalaciones de fritas en los rangos de producción especificados (estimaciones)

Nota: No hay información disponible acerca del tamaño de las instalaciones en Italia.

1.10.2. Productos y Mercados

[tm46 ANFFECC, tm8 S23.03]

La principal aplicación de la frita de vidrio es la fabricación de barnices y pigmentos para cerámicas. Estos barnices, cuando se aplican a la superficie de cuerpos de cerámica como baldosas y vajillas, y luego se cuecen, proporcionan una capa impermeable, protectora y decorativa. Las fritas pueden venderse en forma pura a los fabricantes de cerámicas que crean sus propios barnices, o los fabricantes de fritas pueden producir y suministrar los barnices por sí mismos. Dentro del sector, lo normal es que más de la mitad de la frita fabricada se utilice internamente en la producción de barnices.

Las fritas de esmalte se utilizan en la fabricación de esmaltes cuya principal aplicación es el recubrimiento de superficies metálicas para proporcionar un recubrimiento física y químicamente resistente. El principal mercado para los esmaltes es en la fabricación de equipos de cocción, y como recubrimiento para hornillos, hornos, grills, etc. Otras aplicaciones de los esmaltes son tanques de almacenamiento, silos, baños, componentes electrónicos y rótulos.

Las fritas son productos relativamente de alto valor y bajo volumen, y los costes de transporte por lo general representan un porcentaje relativamente bajo del precio total del producto. La consolidación mundial existente en la industria tiene como consecuencia un menor número de plantas de mayor tamaño que sirven a mercados internacionales más amplios.

1.10.3. Consideraciones Comerciales

[tm46 ANFFECC, tm8 S23.03]

Los volúmenes de producción han mostrado un crecimiento global razonable, y España ha registrado un aumento en las ventas en 1997 de más del 15%, de las que un considerable porcentaje se cree que se han realizado en la UE.

Hay una feroz competencia entre los productores en la UE, a nivel nacional y entre Estados Miembros. La mayoría de las fritas producidas en la UE se utilizan internamente, pero las exportaciones son un mercado importante para los productores de la UE y son por lo general significativamente mayores que las importaciones de los países extracomunitarios. El comportamiento del Sector de Fritas sigue estrechamente la evolución del Sector de Cerámica en su conjunto, y si éste último decae, el Sector de Fritas que le sirve también sufre. Las importaciones a la UE de productos que utilizan fritas es potencialmente una mayor amenaza que las importaciones de fritas en sí.

La producción de frita de vidrio es una industria bien establecida y ha abastecido al sector de cerámica durante muchos años. La competencia de los barnices en crudo, que no contienen frita, está limitada por sus propiedades de lixiviación relativamente malas. Se han desarrollado recubrimientos plásticos para vajillas, pero adolecen de los mismos problemas de lixiviados que los barnices en crudo, particularmente en presencia de ácidos orgánicos, que normalmente se encuentran en los alimentos. Se desconoce hasta qué grado los recubrimientos de plástico pueden influir sobre el mercado de las baldosas esmaltadas con fritas. Las amenazas a los barnices esmaltados por parte de posibles sustitutos son pequeñas. Ciertas alternativas, como las pinturas, tienen posibles usos en aplicaciones similares, pero no pueden equipararse a las propiedades de los esmaltes en términos de resistencia al calor, a los agentes químicos y a las rayaduras, así como en cuanto a su facilidad de limpieza.

1.10.4. Principales Aspectos Medioambientales

El principal problema medioambiental asociado con la producción de fritas es que se trata de un proceso a alta temperatura y con un uso intensivo de energía. Esto produce la emisión de productos de combustión y la oxidación a alta temperatura del nitrógeno atmosférico, lo que genera dióxido de azufre, dióxido de carbono y óxidos de nitrógeno. Las emisiones de los hornos contienen asimismo polvo (derivado de la volatilización y subsiguiente condensación de las materias volátiles existentes en la mezcla) y trazas de cloruros, fluoruros y metales si se hallan presentes como impurezas en las materias primas. Las fritas producidas para esmaltes pueden producir sustanciales emisiones de fluoruros debido al uso de materias primas que contienen fluoruros en la mezcla. Existen soluciones técnicas para minimizar todas estas emisiones, pero cada técnica lleva asociadas implicaciones económicas y medioambientales.

El agua se utiliza principalmente para enfriamiento y limpieza, aunque también para fragmentar el vidrio fundido para producir la frita (enfriamiento) y para molienda húmeda. Generalmente, estos circuitos de agua son circuitos cerrados con una purga. El agua utilizada para enfriamiento puede no requerir una purga, pero requerirá la separación de los sólidos.

Los niveles de residuos son muy bajos, y proceden principalmente de los sólidos recogidos de los circuitos de agua. En muchos casos, los residuos del equipo de eliminación de polvo pueden reciclarse al horno.

CAPÍTULO 2. PROCESOS Y TÉCNICAS APLICADAS

Las primeras tres secciones generales de este capítulo cubren las materias primas comunes y las consideraciones de fusión aplicables a la mayoría de sectores de la Industria de Vidrio. Las siguientes secciones describen luego por separado los aspectos específicos de cada uno de los sectores. Tres de los sectores, lana de roca, fritas y fibra cerámica, difieren en algunas de las materias primas y técnicas empleadas. Estas diferencias se han cubierto en las secciones relativas a cada sector.

2.1. Manipulación de Materias primas

La diversidad de la Industria del Vidrio precisa de una amplia gama de materias primas. La mayoría de estas materias son compuestos inorgánicos sólidos, que pueden ser minerales naturales o sintéticos. Van desde materiales muy gruesos a polvos finamente divididos. Los líquidos y, en menor medida, los gases, se utilizan asimismo en la mayoría de sectores.

Los gases utilizados incluyen hidrógeno, nitrógeno, oxígeno, dióxido de azufre, propano, butano y gas natural. Estos se almacenan y manipulan en formas convencionales, como por ejemplo, conductos directos, almacenamiento en tanques y bombonas. Se utiliza una amplia gama de materias primas líquidas, incluidas algunas que requieren una manipulación cuidadosa como el fenol y los ácidos minerales fuertes. Se utilizan todas las formas habituales de almacenaje y manipulación existentes en la industria, como almacenamiento en tanques, contenedores intermedios, bidones y recipientes pequeños. Las posibles técnicas para minimizar las emisiones del almacenamiento y manipulación de líquidos se discuten en el Capítulo 4.

Los materiales muy gruesos (es decir, con diámetros de partícula > 50 mm) sólo se utilizan en la producción de lana de roca. Estas materias primas son suministradas mediante transporte ferroviario o por carretera, y se llevan directamente mediante transportadores a silos o se apilan en almacenes. Los almacenes pueden ser abiertos, parcialmente cerrados o totalmente cerrados. En el sector existen ejemplos de todos ellos. Cuando se almacenan materias primas gruesas en silos, éstos son normalmente abiertos y son rellenados por un sistema de cinta transportadora. Las materias primas son luego transferidas al horno mediante sistema de transportadores cerrado. Las materias primas se mezclan simplemente colocándolos de forma simultánea en el transportador de alimentación.

Las materias primas granuladas y en polvo se suministran en trenes o camiones cisterna y son transferidas neumáticamente o mecánicamente a silos de almacenamiento. La transferencia neumática de las materias primas requiere que estén esencialmente secas. El aire desplazado de los silos se suele filtrar. Las materias primas de menor volumen pueden suministrarse en sacos o barriles y normalmente se alimentan por gravedad a los recipientes de mezcla.

En los procesos continuos, las materias primas se transfieren a silos intermedios de menor tamaño desde donde se pesan, muchas veces automáticamente, para obtener una mezcla de formulación precisa. La mezcla se transporta a la zona del horno, donde se alimenta desde una o más tolvas. En la industria existen diversos mecanismos de alimentación, que van desde sistemas completamente abiertos a sistemas de alimentación helicoidal totalmente cerrados. Para reducir el polvo durante el transporte y el “arrastre” de partículas finas fuera del horno, puede mantenerse un porcentaje de agua en la mezcla, normalmente entre un 0 y un 4% (algunos procesos, como la producción de vidrio de borosilicato, utilizan materias primas de mezcla secos). El contenido de agua puede introducirse como vapor al final de la operación de mezcla, pero las materias primas pueden tener un contenido de agua inherente. En el vidrio sodocálcico, el vapor se utiliza para mantener la temperatura por encima de 37°C y con ello evitar que la mezcla se seque por la disolución del carbonato sódico.

Debido a su naturaleza abrasiva y mayor tamaño de partícula, el vidrio recuperado se manipula normalmente por separado de las materias primas de mezcla primarias, y puede ser suministrado al horno en cantidades medidas mediante un sistema separado.

En los procesos discontinuos, la planta de mezcla es normalmente mucho menor y a menudo se opera de modo manual. Tras la mezcla, ésta puede almacenarse en pequeñas tolvas móviles, cada una de las cuales contiene una mezcla para el horno de fusión. Se confeccionan varias mezclas, en ocasiones de distintas formulaciones, que se almacenan cerca del horno de fusión para su uso durante un periodo de fusión específico. Al igual que en la fusión a gran escala, la mezcla no puede almacenarse durante demasiado tiempo antes de su uso, dado que los distintos componentes pueden asentarse, lo que dificulta la obtención de una fusión homogénea. La presencia de agua en la mezcla sirve para mitigar esta tendencia.

2.2. Fusión de Vidrio

La fusión, o combinación de las distintas materias primas a alta temperatura para formar un vidrio fundido, es la fase central en la producción de vidrio. Hay numerosas formas de fundir vidrio según el producto deseado, su uso final, la escala de operación, y los factores comerciales predominantes. La formulación del vidrio, la técnica de fusión, la elección del combustible y el tamaño del horno dependerán de estos factores.

2.2.1. Materias Primas para la Fabricación de Vidrio

[tm18 CPIV, tm21 Schott]

La Tabla 2.1 muestra las materias primas más importantes para la fabricación de vidrio. En el Capítulo 3 se incluye una tabla más detallada.

Materias primas para la formación del vidrio

Arena de sílice, vidrio de desecho de proceso, vidrio de desecho de consumo.

Materias primas fundentes, estabilizantes y afinantes

Carbonato sódicos (Na_2CO_3), caliza (CaCO_3), dolomita ($\text{CaCO}_3\text{MgCO}_3$), feldespato, sienita nefelínica, carbonato potásico, espato flúor, alúmina, óxido de zinc, óxido de plomo, carbonato de bario, basalto, sulfato sódico anhidro, sulfato cálcico y yeso, sulfato bárico, nitrato sódico, nitrato potásico, materias primas que contienen boro (Ej. bórax, colemanita, ácido bórico), óxido de antimonio, trióxido de arsénico, escoria de alto horno (mezcla de calcio, aluminio, silicato de magnesio y sulfuro de hierro).

Agentes Colorantes/Decolorantes

Cromito Férrico ($\text{Fe}_2\text{O}_3\text{Cr}_2\text{O}_3$), óxido férrico (Fe_2O_3), óxido de cobalto, selenio/zinc

Tabla 2.1: Materias primas importantes para la fabricación de vidrio

La arena es la materia prima más importante para la fabricación de vidrio, siendo la principal fuente de SiO_2 . Es una materia prima abundante, pero la mayoría de yacimientos no son de suficiente pureza para la fabricación de vidrio. El punto de fusión de la arena es demasiado elevado para que la fusión sea económica, por lo que se requiere un agente fundente, normalmente óxido sódico, para reducir la temperatura de fusión.

El carbonato sódico (Na_2CO_3) es la fuente principal del fundente de óxido sódico (Na_2O). Durante la fusión, el óxido sódico pasa a formar parte del material fundido y se libera dióxido de carbono. También se agrega sulfato sódico como agente afinante y oxidante, siendo una fuente secundaria de óxido sódico. El óxido sódico se incorpora al vidrio, y se liberan gases de óxido de azufre a través del material fundido. El carbonato potásico (K_2CO_3) actúa como fundente y se utiliza en algunos procesos, especialmente para vidrio especial. El óxido potásico se incorpora al material fundido y se emite dióxido de carbono.

Otros óxidos de metales se agregan al vidrio para reforzar la red estructural y mejorar la dureza y la resistencia química. El óxido de calcio (CaO) tiene este efecto, y se agrega al vidrio como carbonato cálcico (CaCO_3) en forma de caliza o yeso. También puede agregarse como dolomita, que contiene carbonato

to cálcico y carbonato magnésico ($MgCO_3$). El óxido de aluminio (Al_2O_3) se agrega para mejorar la resistencia química y para mejorar la viscosidad a temperaturas bajas. Normalmente se agrega en forma de sienita nefelínica ($Na_2O.K_2O.Al_2O_3.SiO_2$), feldespato o alúmina, aunque también está presente en la escoria de alto horno y en la arena feldespática.

Los óxidos de plomo (PbO y Pb_3O_4) se utilizan para mejorar la sonoridad y para aumentar el índice de refracción del vidrio y conferir un mejor brillo en productos como el vidrio al plomo. El óxido de bario (derivado del carbonato de bario), el óxido de zinc o el óxido potásico pueden usarse como alternativas al óxido de plomo, pero producen niveles más bajos de densidad y brillo que los asociados con el vidrio al plomo. También se reduce la trabajabilidad del vidrio fabricado a mano.

El trióxido de boro (B_2O_3) es esencial en algunos productos, particularmente el vidrio especial (vidrios de borosilicato) y en las fibras de vidrio (lana de vidrio y filamentos continuos). El efecto más importante del trióxido de boro es la reducción del coeficiente de dilatación del vidrio, en las fibras modifica la viscosidad y la fluidez para facilitar la fibrado y confiere resistencia al ataque con agua.

La Tabla 2.2 siguiente muestra algunos de los elementos utilizados para conferir color al vidrio. Las materias primas colorantes pueden agregarse en la mezcla principal o en el canal a continuación del horno (en forma de frita coloreada).

Elemento	Ión	Color
Cobre	(Cu^{2+})	Azul claro
Cromo	(Cr^{3+})	Verde
	(Cr^{6+})	Amarillo
Manganoso	(Mn^{3+})	Violeta
Hierro	(Fe^{3+})	Amarillo
	(Fe^{2+})	Azul
Cobalto	(Co^{2+})	Azul puro; en vidrios al borato, rosa
	(Co^{3+})	Verde
Níquel	(Ni^{2+})	Marrón grisáceo, amarillo, verde, azul a violeta, según la matriz del vidrio
Vanadio	(V^{3+})	Verde en vidrio al silicato; marrón en vidrio al borato
Titanio	(Ti^{3+})	Violeta (fusión en condiciones reductoras)
Neodimio	(Nd^{3+})	Violeta rojizo
Selenio	(Se^0)	Rosa (también Se^{2+} , Se^{4+} , y Se^{6+} , según el tipo de vidrio)
Praseodimio	(Pr^{3+})	Verde claro

Tabla 2.2: Elementos utilizados para conferir color

Las materias primas que contienen flúor (Ej. espato flúor, CaF_2) se utilizan para dar opacidad a determinados productos. Esto se consigue mediante la formación de cristales en el vidrio, que lo hacen nebuloso y opaco. El flúor se utiliza asimismo en el sector de filamentos continuos de vidrio para optimizar la tensión superficial y la fluidez, para facilitar la fibrado y minimizar la rotura de las fibras.

Una materia prima de importancia creciente en la fabricación del vidrio es el vidrio de desecho, de procedencia tanto interna como externa. Prácticamente todos los procesos reciclan su vidrio de desecho interno, pero para algunos procesos las restricciones de calidad significan que puede que no sea posible obtener un suministro de vidrio recuperado exterior de suficiente calidad y consistencia para hacer que su uso sea económicamente viable. En el sector de vidrio para envases a veces se alcanzan porcentajes de vidrio recuperado superiores al 80% de la mezcla. El vidrio recuperado requiere menos energía para su fusión que las materias primas vírgenes, y cada tonelada de vidrio recuperado supone un ahorro de aproximadamente 1,2 toneladas de materias primas vírgenes.

2.2.2. El Proceso de Fusión [tm21 Schott]

El proceso de fusión es una combinación compleja de reacciones químicas y procesos físicos. Esta sección sólo presenta un breve resumen de algunos de los aspectos importantes del proceso. La fusión puede dividirse en varias fases, y todas ellas requieren un control muy estricto.

Calentamiento

La forma convencional y más común de suministrar calor al vidrio fundido es quemando combustibles fósiles sobre un baño de material de mezcla, que se alimenta de forma continua y luego se extrae de horno en estado fundido. La temperatura necesaria para fundir y afinar el vidrio depende de la formulación precisa, pero está entre 1300 °C y 1550 °C. A estas temperaturas, la transferencia de calor está dominada por la transmisión radiactiva, en particular desde la bóveda del horno, que es calentada por las llamas hasta 1650 °C, pero también desde las llamas en sí. Los hornos se diseñan para inducir corrientes convectivas de recirculación de la masa de vidrio fundido en el interior de las materias primas de la mezcla, con el fin de garantizar una homogeneidad del vidrio fundido que se alimenta al proceso de conformación. La masa de vidrio fundido contenida en el horno se mantiene constante, y el tiempo de estancia medio es del orden de 72 horas para hornos de vidrio flotado y de 24 horas para el resto.

Fusión primaria

Debido a la baja conductividad térmica de las materias primas de la mezcla, el proceso de fusión es inicialmente bastante lento, lo que da tiempo a que ocurran los numerosos procesos químicos y físicos. Al calentarse las materias primas, la humedad se evapora, algunas de las materias primas se descomponen, y los gases atrapados en las materias primas escapan. Las primeras reacciones (descarbonatación) ocurren alrededor de 500 °C. Las materias primas comienzan a fundirse entre 750 °C y 1200 °C. Primero, la arena comienza a disolverse bajo el influjo de los agentes fundentes. La sílice de la arena se combina con el óxido sódico del carbonato sódico y con otras materias primas de la mezcla para formar silicatos. Al mismo tiempo se desprenden grandes cantidades de gas por la descomposición de los hidratos, carbonatos, nitratos y sulfatos, dando agua, dióxido de carbono, óxidos de nitrógeno y óxidos de azufre. El vidrio fundido se hace finalmente transparente y se completa la fase de fusión. El volumen del material fundido es entonces de alrededor del 35 – 50% del volumen de las materias iniciales de la mezcla debido a la pérdida de gases y la eliminación de espacios intersticiales.

Afino y Homogeneización

El vidrio fundido debe ser completamente homogeneizado y estar libre de burbujas antes de que pueda ser transformado a productos. Esto supone la completa disolución e incluso la distribución de todos los componentes, así como la eliminación de todas las burbujas por afinado.

Durante el proceso de fusión se forman burbujas de gas, principalmente por el dióxido de carbono desprendido por la descomposición de las materias primas de carbonato (principalmente carbonato sódico y caliza) y en mucha menor medida por el aire atrapado en las materias primas. Estas burbujas deben ser eliminadas del vidrio fundido, ya que pueden causar defectos en el producto acabado, lo que afecta a su resistencia mecánica y al aspecto. El movimiento ascendente de las burbujas contribuye a la mezcla física del material fundido, necesaria para obtener un material homogéneo con propiedades físicas óptimas. Las burbujas ascienden a velocidades determinadas por su tamaño y la viscosidad del vidrio. Las burbujas grandes suben rápidamente y contribuyen a la mezcla, mientras que las burbujas pequeñas se mueven lentamente, a velocidades que pueden ser pequeñas respecto a las corrientes de convección de mayor escala del horno, por lo que son más difíciles de eliminar. Las burbujas pequeñas que quedan en el vidrio acabado se denominan “puntos”.

El dióxido de carbono y los componentes del aire tienen solubilidad limitada en el vidrio fundido, y suele ser necesario utilizar agentes químicos de afino para eliminar eficazmente las burbujas pequeñas generadas por el proceso de fusión. El principio general del afino químico es la adición de materias primas que una vez en el material fundido liberan gases con solubilidad apropiada en el vidrio. Según la solubilidad del gas en el vidrio fundido (que por lo general depende de la temperatura), las burbujas pueden aumentar de tamaño y ascender a la superficie, o ser totalmente reabsorbidas. Las burbujas pequeñas tienen una elevada relación superficie – volumen, lo que permite un mejor intercambio entre el gas contenido en las burbujas y el vidrio.

El agente de afino más frecuentemente utilizado en la industria del vidrio es el sulfato sódico. A unos 1450 °C (1200 °C si hay agentes reductores presentes), el sulfato sódico se descompone dando óxido sódico (que se incorpora en el vidrio), óxidos gaseosos de azufre, y oxígeno. Las burbujas de oxígeno se combinan o absorben otros gases, particularmente dióxido de carbono y aire, con lo que aumentan de volumen y ascienden a la superficie. Los óxidos gaseosos de azufre son absorbidos en el vidrio, o se unen a la corriente de gases residuales del horno.

En la producción de vidrio plano y de vidrio para envases, el sulfato sódico es con mucho el agente de afino más común. El predominio del sulfato sódico como agente de afino es debido a su acción paralela como agente oxidante para ajustar el estado redox de los elementos colorantes del vidrio. Es también el agente de afino eficaz menos caro para producción en masa de vidrio. Entre otros agentes de afino se incluyen materias primas de carbono y óxidos de arsénico y antimonio. Estos son más caros, llevan asociados aspectos medioambientales y de salud, y tienden a utilizarse principalmente para la producción de vidrio especial. El nitrato sódico puede usarse como agente afinante / oxidante, particularmente si se requiere un alto grado de oxidación. En ocasiones se emplea sulfato cálcico y diversos nitratos para vidrio plano coloreado.

La homogeneización puede también favorecerse introduciendo burbujas de vapor, oxígeno, nitrógeno o más comúnmente aire a través de un equipo situado en el fondo de la cuba. Esto favorece la circulación y la mezcla del vidrio y mejora la transferencia de calor. Algunos procesos, por ejemplo la producción de vidrio óptico, pueden utilizar mecanismos de agitación para obtener el elevado grado de homogeneidad requerido. Otra técnica utilizada en hornos pequeños (especialmente en vidrio especial) se denomina “alisado”, y consiste en aumentar la temperatura del vidrio para que se haga menos viscoso y las burbujas de gas puedan ascender más fácilmente a la superficie.

Las temperaturas de bóveda máximas existentes en hornos de vidrio son: vidrio para envases 1660 °C, vidrio plano 1620°C, vidrio especial 1650 °C, filamento continuo 1650 °C, y lana de vidrio 1400 °C.

Acondicionamiento

A las fases de fusión primaria y afino sigue una fase de acondicionamiento a bajas temperaturas. Durante este proceso, todas las burbujas solubles restantes se reabsorben en el material fundido. Al mismo tiempo, el vidrio fundido se enfriá a una temperatura operativa entre 900°C y 1350°C.

En la fusión en discontinuo, estos pasos se producen en secuencias, pero en hornos continuos las fases de fusión ocurren simultáneamente en distintas zonas de la cuba. La mezcla se alimenta por un extremo de la cuba y fluye a través de las distintas zonas de la cuba y antecuerpos, donde se produce la fusión primaria, el afino y el acondicionamiento. El proceso de afino en un horno continuo es bastante más delicado.

El montón de la mezcla, o la mezcla fría de materias primas no sólo se funde en la superficie, sino que también se disuelve por la parte inferior por efecto de la masa de vidrio ya fundido. Bajo la capa inferior del material de mezcla se forma un vidrio con burbujas relativamente frío, que se hunde al fondo de la cuba. Las corrientes de convección apropiadas deben llevar este material a la superficie, dado que el afino, en los hornos de cuba, se produce principalmente en la superficie de la masa de vidrio fundido, donde las burbujas sólo tienen que ascender una distancia corta para escapar. Si las corrientes térmicas fluieren demasiado rápidamente, inhiben el afino, al llevar el vidrio demasiado pronto a la zona de acondicionamiento. Pueden construirse muros o diques guía en la estructura interior de la cuba para forzar recorridos ideales de flujo del vidrio.

2.3. Técnicas de Fusión

[tm18 CPIV]

Esta sección resume las técnicas de fusión más importantes utilizadas dentro de la industria del vidrio. Dentro de los sectores de lana de roca y de fritas se utilizan técnicas distintas, que se discuten por

separado dentro de las secciones específicas para cada sector. Como se ha indicado anteriormente, la elección de la técnica de fusión dependerá de muchos factores, pero en particular de la capacidad requerida, la formulación del vidrio, los precios de los combustibles, la infraestructura existente y del comportamiento medioambiental. Por ejemplo, como guía general (a la que hay inevitables excepciones):

- Para instalaciones de gran capacidad ($> 500 \text{ t/d}$) casi siempre se emplean hornos regenerativos de llama transversal.
- Para instalaciones de capacidad media (100 – 500 t/d), suelen preferirse hornos regenerativos de llama de bucle, aunque también pueden usarse unidades fundidoras de recuperación, y en ocasiones pueden usarse hornos de fusión de oxicombustión o eléctricos.
- Para instalaciones de pequeña capacidad (25 – 100 t/d) por lo general se emplean unidades fundidoras de recuperación, hornos regenerativos de llama de bucle, hornos de fusión eléctricos y de oxicombustión.

La tabla inferior da una estimación de los distintos tipos de hornos existentes en la UE, con las cifras y capacidades de cada tipo.

Tipo de horno	Número de unidades	Capacidad de fusión (t/a)	Capacidad de fusión media (t/d)
Llama de bucle	265	13.100.000	135
Llama transversal	170	15.300.000	250
Eléctricos	100	1.100.000	30
Oxígeno	30	1.200.000	110
Otros	335	4.300.000	35
Total	900	35.000.000	110

Tabla 2.3: Estimación de los tipos de hornos en la UE en 1997 [tm18 CPIV]

Los hornos de vidrio están generalmente diseñados para fundir grandes cantidades de vidrio a lo largo de un periodo continuo de hasta 12 años, y un rango de producción entre 20 y 600 toneladas de vidrio diarias. El vidrio se halla contenido en una cuba construida de bloques de los materiales refractarios apropiados, generalmente de forma global rectangular, cerrada por un techo en forma de bóveda. Los hornos eléctricos tienden a ser más cuadrados, con techo plano, y abiertos por un lado para el acceso de la mezcla. Los bloques refractarios son mantenidos en posición por una carcasa de acero. Se utilizan muchos diseños de hornos, y normalmente se distinguen por el método de calentamiento, el sistema de precalentamiento del aire de combustión empleado, y la posición de los quemadores.

La fabricación de vidrio es una actividad que hace un uso muy intensivo de la energía, por lo que la técnica de calentamiento y el método de recuperación de calor son cruciales en el diseño del horno. Las mismas elecciones son también algunos de los factores más importantes que afectan el comportamiento medioambiental y la eficacia energética de la operación de fusión. Las tres principales fuentes de energía para la fabricación de vidrio son gas natural, fuel-oil y electricidad. En la primera mitad del siglo XX, muchos fabricantes de vidrio utilizaban gas de gasógeno, generado por las reacciones del aire y el agua con carbón a temperaturas de incandescencia.

El uso del gas natural va en aumento en la Industria del Vidrio, debido a su elevada pureza, facilidad de control y el hecho de que no se requieren instalaciones de almacenamiento. En la actualidad, muchas empresas utilizan gas con preferencia al fuel-oil con objeto de reducir las emisiones de dióxido de azufre, incluso si ello supone un mayor coste.

En décadas recientes, el combustible predominante para la fabricación de vidrio ha sido el fuel-oil. Existen varias calidades, desde pesado a ligero, con distintas purezas y contenidos de azufre. La opinión general en la industria es que las llamas de fuel-oil, al ser más radiantes que las llamas de gas, dan una mejor transferencia de calor al material fundido. A medida que la industria ha desarrollado mayor experiencia con la combustión de gas se cree que la eficacia y el control operativo conseguidos con la combustión a gas se acerca progresivamente a los del fuel-oil.

Muchos hornos grandes están equipados para funcionar tanto con gas natural como con fuel-oil, siendo necesario sólo un simple cambio de inyectores. En muchos casos, los contratos de suministro de gas se negocian sobre una base de ininterrumpibilidad durante épocas de máxima demanda, lo que requiere poder disponer de la posibilidad de cambio a fuel-oil. El motivo principal de alternar entre gas y fuel-oil es el precio variable de los combustibles. Para potenciar el control del aporte de calor es frecuente que hornos predominantemente con combustión a gas quemen fuel-oil en una o dos tomas.

La tercera fuente de energía común es la electricidad. La electricidad puede usarse como fuente de energía exclusiva o en combinación con combustibles fósiles, lo que se describe con más detalle posteriormente. La electricidad puede usarse para suministrar energía en tres formas básicas: calentamiento resistivo, en el que se pasa una corriente a través del vidrio fundido; calentamiento inductivo, en el que se induce calor mediante un campo magnético circundante; y el uso de elementos de calentamiento. El calentamiento resistivo es la única técnica que ha encontrado aplicación comercial dentro de la Industria del Vidrio, y es la única técnica considerada en el presente documento.

2.3.1. Hornos Regenerativos

[tm18 CPIV, tm1 UKDoE]

El término regenerativo hace referencia a la forma de sistema de recuperación de calor. Los quemadores que queman combustibles fósiles están normalmente situados dentro o debajo de las tomas de aire de combustión / gas residual. El calor de los gases residuales se utiliza para precalentar el calor antes de la combustión. Esto se consigue pasando los gases residuales a través de una cámara que contiene material refractario, que absorbe el calor. El horno, en cualquier momento dado, sólo combustionea en dos grupos de quemadores. Al cabo de un periodo predeterminado, normalmente de veinte minutos, el ciclo de combustión del horno se invierte y el aire de combustión pasa a través de la cámara previamente calentada por los gases residuales. Un horno regenerativo tiene dos cámaras regenerativas, y mientras una cámara es calentada por gas residual del proceso de combustión, la otra precalienta el aire de combustión entrante. La mayoría de plantas de envases de vidrio tienen hornos regenerativo de llama de bucle o de llama transversal, y todos los hornos de vidrio flotado tienen diseño regenerativo de llama transversal. Pueden alcanzarse temperaturas de precalentamiento de hasta 1400 °C, lo que produce eficacias térmicas muy elevadas.

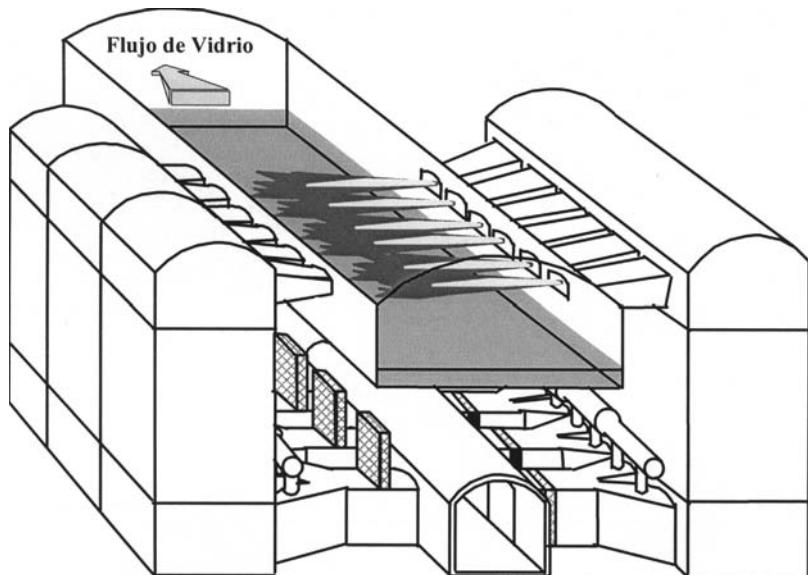


Figura 2.1: Horno regenerativo de llama transversal

En los hornos regenerativos de llama transversal, los pórticos de combustión y los inyectores están situados a ambos lados del horno, las cámaras regenerativas están situadas también a ambos lados del

hornos y están conectadas al horno a través de los conductos de los pórticos de los quemadores. La llama pasa por encima del material fundido directamente a los pórticos opuestos. El número de pórticos (hasta 8) utilizados es función del tamaño y la capacidad del horno, así como de su diseño particular. Algunos hornos grandes pueden tener las cámaras regenerativas divididas para cada pórtico de quemador.

Este tipo de diseño que utiliza de forma eficaz una multiplicidad de quemadores es particularmente adecuado para grandes instalaciones, ya que facilita la diferenciación de la temperatura a lo largo de la longitud del horno necesaria para estimular las corrientes de convección requeridas en el vidrio fundido.

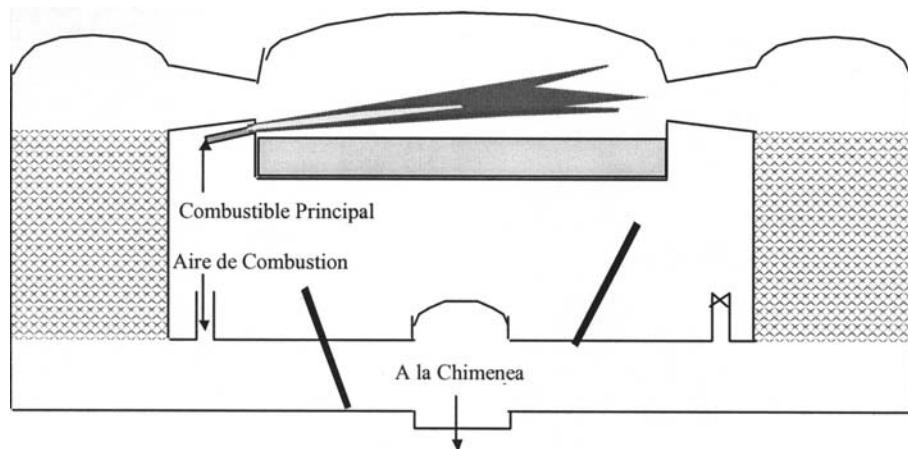


Figura 2.2: Sección transversal de un horno regenerativo

En los hornos regenerativos de llama de bucle, los principios de funcionamiento son los mismos, aunque las dos cámaras regenerativas están situadas una en cada extremo del horno con un solo pórtico. El camino de las llamas tiene forma de U y retorna al regenerador adyacente a través del segundo pórtico. Esta disposición permite un sistema de regeneración más eficaz que el diseño de combustión transversal, aunque tiene menos flexibilidad para ajustar el perfil de temperatura del horno y por consiguiente es menos empleado para hornos grandes.

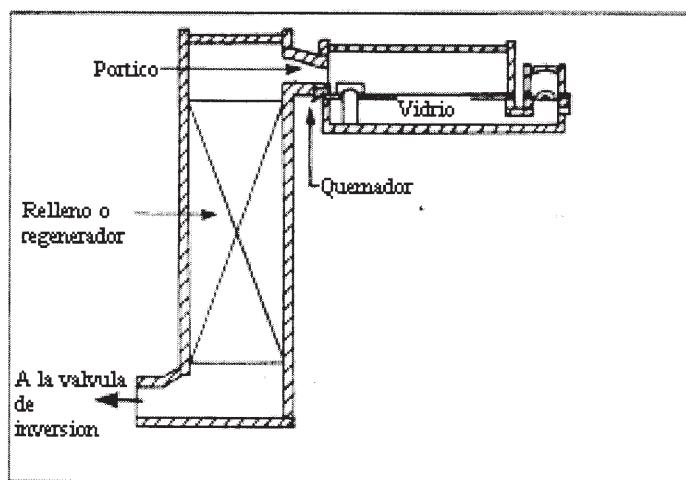


Figura 2.3: Horno regenerativo de llama de bucle de una sola pasada

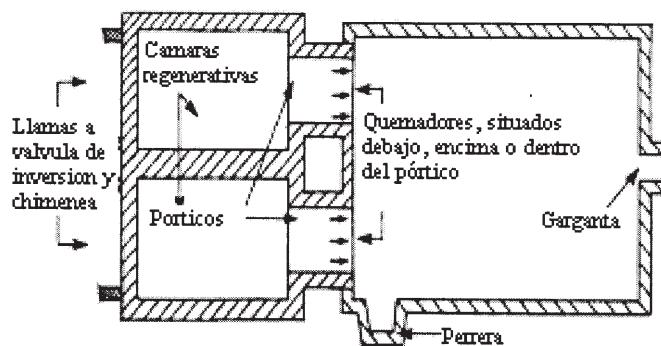


Figura 2.4: Vista en planta de un horno regenerativo de llama de bucle

2.3.2. Hornos de Recuperación

[tm18 CPIV]

El recuperador es otra forma común de sistema de recuperación de calor utilizada normalmente para hornos pequeños. En este tipo de esquema el aire frío entrante es precalentado indirectamente por un flujo continuo de gas residual a través de un intercambiador de calor metálico (o, excepcionalmente, cerámico). Las temperaturas de precalentamiento de horno están limitadas a unos 800 °C para recuperadores metálicos, y el calor recuperado por este sistema es por consiguiente menor que en el horno regenerativo. La menor eficacia energética directa puede compensarse mediante sistemas adicionales de recuperación de calor de los gases residuales, para el precalentamiento de las materias primas o para la producción de vapor. No obstante, una consecuencia es que la capacidad de fusión específica de los hornos recuperativos está limitada a 2 toneladas/m²/día en comparación al valor típico de 3,2 toneladas/m²/día para un horno regenerativo en el sector de Vidrio para Envases. Esta falta de capacidad de fusión puede ser parcialmente compensada mediante el uso de refuerzo eléctrico.

Aunque originalmente los hornos de fusión (u hornos de combustión directa) no estaban necesariamente equipados con recuperadores, ahora es así de forma exclusiva, y el término horno de fusión se ha convertido en sinónimo de horno de recuperación. Los quemadores están situados a ambos lados del horno, transversales al flujo de vidrio, y queman continuamente desde ambos lados. Esto permite un mejor control y temperaturas más estables que en los hornos de llama de bucle. Controlando los quemadores para crear un gradiente de temperatura a lo largo del horno, las corrientes convectivas generadas arrastran los gases de combustión calientes sobre la superficie de la mezcla, ascendiendo luego a través del pórtico de escape en el extremo de entrada del horno.

Este tipo de horno se utiliza principalmente cuando se requiere una alta flexibilidad de operación con una mínima inversión de capital inicial, particularmente cuando la escala de operación es demasiado pequeña para hacer económicamente viables el uso de regeneradores. Es más apropiado para instalaciones de pequeña capacidad, aunque no son infrecuentes hornos de mayor capacidad (hasta 400 toneladas al día).

2.3.3. Fusión con oxícombustión

Esta técnica consiste en la sustitución del aire de combustión por oxígeno (pureza > 90%). La eliminación de la mayoría del nitrógeno de la atmósfera de combustión reduce el volumen de los gases residuales, que están compuestos prácticamente por completo de dióxido de carbono y vapor de agua, en unas dos terceras partes. Por consiguiente, es posible conseguir ahorros energéticos, dado que no es necesario calentar el nitrógeno atmosférico a la temperatura de las llamas. La formación de NOx térmico se reduce en gran medida, dado que el único nitrógeno presente en la atmósfera de combustión es el nitrógeno residual del oxígeno, el nitrógeno del combustible, el nitrógeno de la descomposición de los nitratos, y el del aire parasitario que pueda haber.

En general, los hornos de oxícombustión tienen el mismo diseño que las unidades fundidoras, con

múltiples quemadores laterales y un solo pótico de escape de gas residual. No obstante, los hornos diseñados para combustión con oxígeno no utilizan sistemas de recuperación para precalentar el suministro de oxígeno a los quemadores.

El principio de los hornos de oxicombustión está bien consolidado, particularmente en el sector de fritas. La técnica está todavía siendo estudiada por algunos sectores de la industria del vidrio como una tecnología en desarrollo con un elevado riesgo financiero potencial. No obstante, se está realizando un considerable trabajo de desarrollo y la técnica está ganando mayor aceptación a medida que aumenta el número de plantas. Esta técnica se discute asimismo en el Capítulo 4.

2.3.4. Fusión Eléctrica

[tm18 CPIV, tm8 S2 3.03, tm1 UKDoE]

Un horno eléctrico consiste en una caja con revestimiento refractario apoyada en una estructura de acero, con electrodos insertados desde el lado, la parte superior o, más frecuentemente, el fondo del horno. La energía para la fusión es suministrada por calentamiento resistivo a medida que la corriente pasa a través del vidrio fundido. No obstante, es necesario utilizar combustibles fósiles cuando se templa el horno al inicio de cada campaña. El horno funciona de forma continua y tiene una vida útil de entre 2 y 7 años. La parte superior del vidrio fundido se cubre con una capa de material de mezcla, que se funde gradualmente desde abajo hacia arriba, de ahí el término de horno de fusión de superficie fría. Se agrega material de mezcla fresco a la parte superior del horno, normalmente mediante un sistema de transportador que se mueve a través de toda la superficie. La mayoría de hornos eléctricos están equipados con sistemas de filtros de mangas, y el material recogido se recicla al horno de fusión.

La técnica se aplica comúnmente en hornos pequeños, particularmente para vidrio especial. El motivo principal de ello es que la eficacia térmica de los hornos de combustibles fósiles disminuye con el tamaño del horno, y las pérdidas de calor por tonelada de vidrio fundido de los hornos pequeños pueden ser bastante altas. Las pérdidas de calor de los hornos eléctricos son mucho menores en comparación, y para hornos pequeños la diferencia en los costes de fusión entre el calentamiento eléctrico y con combustibles fósiles es por consiguiente menor que para hornos grandes. Otras ventajas de la fusión eléctrica para hornos pequeños son los menores costes de reconstrucción, la mayor facilidad de operación y el mejor comportamiento medioambiental.

Existe un límite superior de tamaño a la viabilidad económica de los hornos eléctricos, que está estrechamente relacionado con el mayor coste de la electricidad en comparación con los combustibles fósiles. Los hornos eléctricos pueden conseguir mayores capacidades de fusión por metro cuadrado de horno, y la eficacia térmica de los hornos eléctricos es dos o tres veces superior a la de los hornos de combustibles fósiles. No obstante, para hornos grandes esto no suele ser suficiente para compensar los mayores costes de la electricidad.

La ausencia de aire de combustión en la fusión eléctrica significa que los volúmenes de gas residual son extremadamente bajos, lo que produce un bajo arrastre de partículas y reduce el tamaño del equipo de eliminación secundaria. La emisión de componentes volátiles de la mezcla es considerablemente inferior a la de los hornos convencionales, debido al menor caudal de gas y a la absorción y reacción de las emisiones gaseosas en la capa exterior de la mezcla. La principal emisión gaseosa es el dióxido de carbono de los materiales carbonatados de la mezcla.

La sustitución completa de los combustibles fósiles en el horno elimina la formación de productos de combustión, en concreto dióxido de azufre, NOx térmico y dióxido de carbono. No obstante, si se considera globalmente, estos beneficios deben contemplar las emisiones que se producen en la central de energía, y la eficacia de la producción y distribución de energía.

Una complicación de la fusión eléctrica es el uso de nitrato sódico o nitrato potásico en la mezcla. La opinión general de la industria del vidrio es que el nitrato es necesario en los hornos de parte superior

fría para aportar las condiciones oxidantes necesarias para un proceso de fabricación estable, seguro y eficaz. El problema con el nitrato es que se descompone en el horno liberando óxidos de nitrógeno, pero a niveles inferiores que los asociados con la combustión convencional con combustibles fósiles.

2.3.5. Fusión con Combinación de Combustibles Fósiles y Electricidad [tm18 CPIV, tm8 S2 3.03]

Existen dos enfoques principales para el uso de esta técnica: Combustión predominantemente con combustible fósil y refuerzo eléctrico; o calentamiento predominantemente eléctrico con apoyo de combustible fósil. Evidentemente, la proporción de cada tipo de aporte de calor puede variar con cada técnica.

El refuerzo eléctrico (Boosting) es un método de añadir calor adicional pasando una corriente eléctrica a través de electrodos situados en el fondo de la cuba. La técnica se utiliza comúnmente en los hornos en la Industria del Vidrio. Tradicionalmente se utiliza para aumentar la producción de un horno de combustible fósil para atender las fluctuaciones en la demanda sin incurrir en los costes fijos de la operación de un horno de mayor tamaño. La técnica puede instalarse mientras el horno está en funcionamiento, y se utiliza frecuentemente para reforzar el ritmo de trabajo de un horno a medida que se acerca al término de su vida operativa, o para aumentar la capacidad de un horno existente.

El refuerzo eléctrico puede usarse también para mejorar el comportamiento medioambiental del horno, sustituyendo la combustión por calentamiento eléctrico para un determinado ritmo de trabajo de vidrio. Normalmente, el refuerzo eléctrico aporta entre un 5% y un 20% de la energía total, aunque pueden alcanzarse cifras más elevadas. No obstante, los niveles altos de refuerzo eléctrico no se emplean como opción a largo plazo para producción básica debido a los elevados costes operativos asociados. En el vidrio coloreado se utilizan niveles variables de refuerzo eléctrico, debido a la mala transferencia de calor radiante en el vidrio verde y ámbar.

Una técnica menos común es el uso de gas o fuel-oil como combustible de apoyo para un horno calentado principalmente de forma eléctrica. Consiste simplemente en producir llamas sobre la superficie del material de la mezcla para agregar calor a las materias primas y facilitar la fusión. Esta técnica se denomina en ocasiones sobrecombustión y se utiliza con frecuencia para superar algunas de las dificultades operativas encontradas en la fusión 100% eléctrica. Evidentemente, la técnica reduce algunos de los beneficios medioambientales asociados a la fusión de superficie fría sin combustión.

2.3.6. Fusión en Discontinuo [tm21 Schott]

Cuando se requieren cantidades pequeñas de vidrio, particularmente si la formulación del vidrio cambia regularmente, puede ser antieconómico operar un horno continuo. En estos casos se utilizan hornos de crisoles u hornos diarios para fundir mezclas específicas de materia prima. La mayoría de procesos de vidrio de este tipo escapan al control de la IPPC, dado que su capacidad de fusión suele ser inferior a las 20 toneladas diarias. No obstante, hay una serie de ejemplos en vidrio doméstico y vidrio especial en los que existen capacidades por encima de este nivel, particularmente cuando se realiza más de una operación en la misma instalación.

Un horno de crisoles tiene normalmente las paredes internas de ladrillo refractario, ladrillo de sílice para la bóveda abovedada y ladrillo aislante para las paredes externas. Básicamente, un horno de crisoles consta de una sección inferior para precalentar el aire de combustión (sistema regenerativo o de recuperación), y una sección superior que alberga los crisoles y sirve como cámara de fusión. La sección superior alberga de seis a doce crisoles de arcilla refractaria, en los que pueden fundirse distintos tipos de vidrio.

Hay dos tipos de crisoles, abiertos y cerrados. Los crisoles abiertos no tienen cubierta y el vidrio está abierto a la atmósfera del horno. Los crisoles cerrados son herméticos y la única abertura a través del orificio de recogida. En los crisoles abiertos, la temperatura se controla ajustando la combustión del horno, mientras que en los crisoles cerrados la combustión es a velocidad constante, y la temperatura se regula

abriendo o cerrando el orificio de recogida. La capacidad de cada crisol es normalmente del orden de 100 a 500 kg, con una vida útil de 2 a 3 meses en operación continua.

El horno es calentado durante 24 horas cada día, pero la temperatura varía (temperatura del vidrio sólo para crisoles cerrados) según la fase del ciclo de producción. Generalmente, la mezcla se coloca en los crisoles y se funde por la tarde, y se aumenta la temperatura durante la noche para refinar el material fundido de modo que pueda procesarse a la mañana siguiente. Durante la fusión, la temperatura asciende a 1300 – 1600 °C, según el tipo de vidrio, y durante la aspiración y el proceso del vidrio la temperatura del horno es del orden de 900 – 1200 °C.

Los hornos diarios han sido desarrollados a partir de los de crisoles para tener mayores capacidades, del orden de 10 toneladas diarias. Estructuralmente se asemejan más al cuadrángulo de un horno convencional, pero se siguen rellenando de mezcla cada día. La fusión se realiza normalmente de noche y el vidrio pasa a producción al día siguiente. Permiten cambiar con poca antelación el tipo de vidrio a fundir y se utilizan principalmente para vidrio coloreado, vidrio de cristal y vidrios especiales blandos.

2.3.7. Diseños Especiales de Hornos de Fusión

[SORG LoNOx, SORG Flex]

La atención prestada a la limitación de las emisiones de NOx ha hecho que algunos diseñadores de hornos propongan hornos del tipo unidad fundidora que integran diversas características previstas para permitir menores temperaturas de llama. El más conocido de este tipo de horno es el horno de fusión Sorg LoNOx (bajo en NOx).

El horno de fusión Sorg LoNOx (bajo en NOx) utiliza una combinación de afinado con baño poco profundo y precalentamiento de las materias primas para conseguir niveles reducidos de NOx, potencialmente sin la penalización de una reducción en el comportamiento térmico. El afinador de baño poco profundo obliga a que el camino de la importante corriente crítica pase cerca de la superficie del baño de vidrio, reduciendo con ello el diferencial entre el mismo y la superestructura del horno. El horno puede operar a temperaturas más bajas que un horno convencional comparable. Esta técnica se describe más ampliamente en el Capítulo 4.

Otro nuevo diseño es el horno de fusión Sorg Flex, que se comercializa principalmente como alternativa a los hornos de crisoles y hornos diarios. Utiliza una combinación de electricidad y gas natural, lo que produce un horno compacto con bajas temperaturas operativas y bajo consumo de energía. El horno está dividido en zonas de fusión y afino, que están conectadas por un cuello. La zona de afino consiste en un banco poco profundo seguido de una zona más profunda. El lado de fusión está calentado eléctricamente, y la zona de afinado está calentada a gas, pero pueden añadirse electrodos a la entrada. Los gases residuales de la zona de afino paran a través de la zona de fusión y sobre la mezcla. Un número de arcos bajos evitan que la radiación de la parte más caliente del horno alcance las zonas más frías, de modo que una gran parte de la energía de los gases residuales se transfiere a la mezcla.

La separación de las zonas de fusión y afinado es la base de la flexibilidad del horno. Durante los períodos de parada, las temperaturas bajan y se reduce la volatilización del afinado. No se requiere drenaje y, debido al bajo volumen de vidrio, la temperatura operativa normal se restablece rápidamente. El bajo volumen también facilita cambios de composición más rápidos.

2.4. Vidrio para envases

[tm18 CPIV, tm1 UKDoE]

Esta sección trata sobre la fabricación de vidrio para envases, sobre la base de formulaciones de sodio-calcio y modificaciones de las mismas, mediante un proceso totalmente automatizado. La fabricación de otros productos se cubre en los Sectores de Vidrio Doméstico y Vidrio Especial. En la Tabla 2.4

se muestra la composición típica del vidrio para envases. Debido a la diversidad del sector, casi todas las técnicas de fusión descritas en la Sección 2.3 se encuentran en la producción de vidrio para envases.

Componente	Porcentaje
Oxido de Silicio (SiO_2)	71 – 73
Oxido Sódico (Na_2O)	12 – 14
Oxido Cálcico (CaO)	9 – 12
Oxido Magnésico (MgO)	0,2 – 3,5
Oxido de Aluminio (Al_2O_3)	1 – 3
Oxido de Potasio (K_2O)	0,3 – 1,5
Trióxido de Azufre (SO_3)	0,05 – 0,3
Modificadores de Color, etc.	Trazas

Tabla 2.4: Composición típica del vidrio para envases

Los envases de vidrio se producen en un proceso de moldeo de dos etapas utilizando las técnicas de prensado y soplado. En la producción automática de botellas hay cinco etapas esenciales.

1. Obtención de un trozo de vidrio fundido (gota) del peso y temperatura adecuados.
2. Conformación de la forma primaria en un primer molde (molde en blanco) mediante presión de aire comprimido o un émbolo metálico.
3. Transferencia de la forma primaria (paraison) al molde final (molde de acabado).
4. Finalización del proceso de conformado soplando el envase con aire comprimido hasta que tenga la forma del molde final.
5. Retirada del producto acabado para procesos post-moldeo.

El vidrio fundido fluye desde el horno a lo largo de un antecuerpo hasta un canal de alimentación (Feeder). Desde el fondo del feeder se forman de una a cuatro corrientes paralelas de vidrio a través de orificios de tamaño aproximadamente igual. Estas corrientes de vidrio, moduladas por un sistema de émbolo mecánico, se cortan en longitudes precisas por un mecanismo de cizalla formando “gotas” de vidrio primitivas en forma de salchicha. El sistema completo para formar las gotas se denomina mecanismo de alimentación (Feeder). Las gotas son cortadas simultáneamente desde las corrientes paralelas de vidrio para ser enviadas simultáneamente a moldes paralelos de la moldeadora. Éstas se denominan máquinas de gota simple, doble, triple o cuádruple; las últimas están adaptadas a la producción a gran escala de envases pequeños. Las máquinas de doble gota son las más comunes. Los hornos de vidrio para envases alimentan dos o más moldeadoras de este tipo, cada una a través de un antecuerpo independiente.

Sobre las cizallas se pulveriza una mezcla de agua y aceite soluble para asegurar que no se sobre-calienten y que el vidrio no se pegue a las mismas. Desde el mecanismo de alimentación, las gotas son guiadas por un sistema de canalones a los moldes en bruto en la moldeadora.

El proceso de moldeo se realiza en dos etapas, como se muestra en la Figura 2.5. El moldeo inicial de la pieza en bruto puede ser presionando con un émbolo o soplado con aire comprimido, según el tipo de envase. La operación de moldeo final es siempre por soplado hasta obtener la forma hueca acabada. Estos dos procesos se denominan pues respectivamente “prensado y soplado” o “soplado y soplado”. Los envases formados son enviados a las etapas de producción posteriores al moldeo mediante un transportador continuo. El moldeo por prensado y soplado está particularmente adaptado a la producción de tarros, pero también se utiliza ampliamente para la producción de botellas ligeras. El moldeo por soplado y soplado es más versátil y se prefiere para la producción de botellas de peso estándar y formas más complejo. En la Figura 2.5 se muestran esquemas simplificados de los dos principales procesos de moldeo.

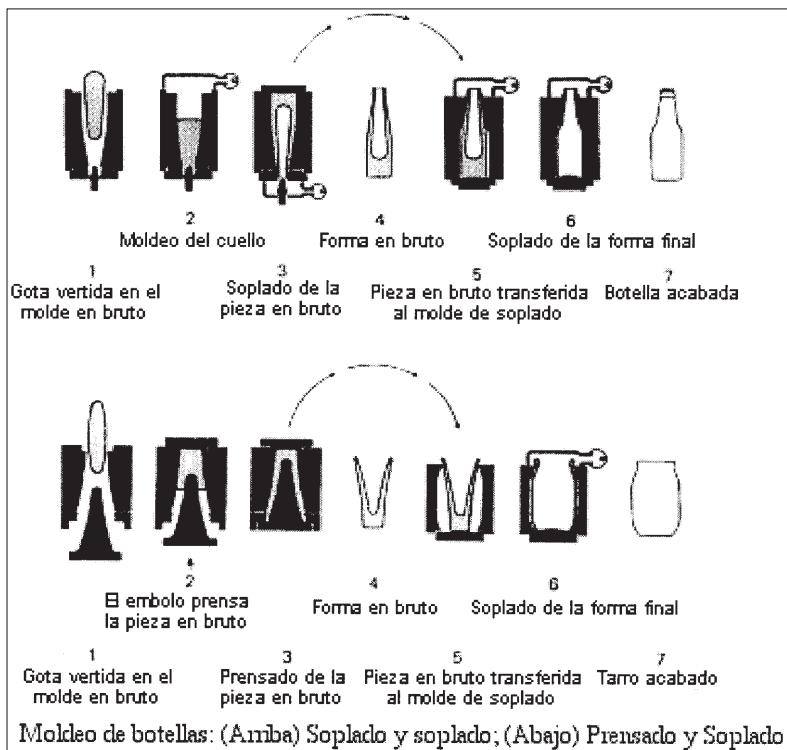


Figura 2.5: Moldeo por prensado-soplado y por soplado-soplado

Durante el proceso de moldeo, la temperatura del vidrio se reduce hasta 600 °C para asegurar que los envases estén suficientemente solidificados para ser retirados por el transportador. La aspiración de calor se efectúa soplando ingentes cantidades de aire contra los moldes y a través de los mismos. Para evitar que el vidrio se pegue a los moldes, se aplican sustancias antidespegue a base de grafito, de forma manual y/o automática, a las partes internas del molde (“swabbing” o fregado). Los moldes requieren limpieza y mantenimiento periódico.

El flujo de vidrio desde el anticuerpo debe mantenerse constante para poder mantener la necesaria estabilidad de temperatura, la viscosidad y homogeneidad del vidrio alimentado al proceso de moldeo. Si el proceso de moldeo se interrumpe en una de las secciones, las gotas de vidrio caliente son desviadas mediante canalones al sótano, donde se enfrián con agua, se fragmentan y se devuelven a la sección de mezcla junto con otros residuos de producción, para ser reciclados como vidrio de desecho (“casco”).

Las primeras máquinas automáticas eran de diseño rotatorio, y aunque las máquinas de moldeo para vajillas todavía emplean este principio, la producción de envases se realiza casi exclusivamente mediante máquinas de IS (Sección Individual) en línea. La máquina de IS consiste en múltiples unidades individuales de producción de envases (secciones) montadas una junto a la otra. Cada sección tiene cavidades de moldeo que corresponden al número de gotas a moldear en paralelo. Las gotas son suministradas en secuencia a las distintas secciones a través de un sistema de aspiración y transferencia (distribución y suministro de gotas). Normalmente, las máquinas de IS se componen de entre 6 y 20 secciones, según el volumen y el tipo de mercado al que se sirve. Una importante ventaja de las máquinas de IS es la posibilidad de parar independientemente las secciones para su ajuste o para cambiar las piezas de los moldes.

La fabricación automática de envases puede usarse para producir botellas y tarros de casi cualquier tamaño, forma y color. Cuanto más simple es la forma, más rápido es el ritmo de producción; las botellas ligeras redondas de cerveza se producen a velocidades de hasta 750 unidades / minuto (en una máquina de IS de 12 secciones y cuádruple gota).

El enfriamiento rápido de los envases en su superficie externa crea elevadas tensiones diferenciales en el vidrio y la consiguiente fragilidad. Para eliminarlas, los envases se pasan a través de un túnel de reco-

cido continuo (lehr), en el que se calientan a 550 °C, y luego se enfrián en condiciones controladas para evitar que se formen nuevas tensiones. Los túneles de recocido se calientan mediante gas o electricidad, pero una vez se alcanza la temperatura operativa el calor de los envases entrantes proporciona la mayor parte de la energía de calentamiento. Una vez suficientemente fríos, los envases son inspeccionados automáticamente con rechazo automático de los envases fuera de tolerancia o con otros problemas de calidad. Tras la inspección, el producto se coloca en palets, en cajas de cartón o a granel, y se embala y almacena antes de su expedición al cliente.

La eficacia global de la producción se mide en forma la relación entre “embalado y fundido”, es decir, la relación en porcentaje entre el tonelaje de envases embalados (para expedición) y el tonelaje de vidrio fundido en el horno. Las instalaciones que fabrican envases para alimentos y bebidas consiguen relaciones entre embalado y fundido del 85% – 94%. Los productos de mayor valor para perfumería y farmacia están sujetos a controles más estrictos, y las relaciones entre embalaje y fundido son el orden del 70%.

Para mejorar las características de los productos, pueden aplicarse recubrimientos superficiales, bien inmediatamente tras el moldeo, mientras los artículos están todavía a una temperatura de más de 500 °C (aplicación de capas en caliente), o tras el recocido (aplicación de capas en frío). Prácticamente siempre se emplea una combinación de aplicación de capas en caliente y en frío.

Los envases de vidrio son transportados a través de distintos sistemas de inspección, embalaje, desembalaje, llenado y reembalaje. Para evitar daños entre los envases y permitir que deslicen por los sistemas de guía, pueden aplicarse tratamientos de lubricación al producto en el lado frío del túnel de recocido. Las materias primas utilizadas son ácido oleico y productos a base de polietileno, son seguros desde el punto de vista alimenticio, que se aplican mediante rociado en suspensión acuosa diluida o mediante contacto con vapores. Estos tratamientos, en general, no dan lugar a emisiones medioambientales significativas.

Pueden aplicarse recubrimientos superficiales en caliente, que normalmente consisten en una capa muy fina de óxido de estaño o de óxido de titanio, a los envases de vidrio inmediatamente tras salir de la moldeadora. En combinación con un recubrimiento superficial lubricante en frío que se aplica posteriormente, sirve para evitar daños en la superficie del vidrio durante la manipulación subsiguiente. El recubrimiento de óxido metálico actúa como substrato, reteniendo las moléculas orgánicas lubricantes en la superficie del vidrio, y esto permite desarrollar un alto nivel de resistencia a la rayadura con lubricantes de uso alimentario. El tratamiento en el lado caliente mejora asimismo la resistencia mecánica.

Los tratamientos en sí deben ser invisibles y por lo tanto son extremadamente finos. El espesor del tratamiento superficial en caliente es generalmente < 0,01 µm. Para obtener recubrimientos uniformes de este espesor, el tratamiento se realiza muy frecuentemente mediante deposición química de vapor (DQV), utilizando los cloruros anhidros de estaño o titanio, o compuestos organometálicos específicos. También se emplea la aplicación mediante aerosol. La cantidad de material es siempre baja, del orden de 2 a 10 kg/día por línea de producción, según la velocidad de producción.

Una vez fabricados, los envases de vidrio pueden en ciertos casos pasar a través de un proceso secundario para añadir elementos decorativos e identificativos antes de ser enviados al cliente. Esto puede ser en forma de una etiqueta sensible a la presión o que se contrae con el calor, o una decoración cerámica aplicada por calor.

2.5. Vidrio Plano

[tm18 CPIV]

El término vidrio plano incluye estrictamente todos los vidrios fabricados en forma plana, independientemente de la forma de fabricación. No obstante, a efectos del presente documento se utiliza para describir la producción de vidrio flotado y de vidrio laminado. La mayoría de los otros vidrios planos producidos comercialmente se cubren en el Sector de Vidrio Especial (Ej. hornillos cerámicos) o la escala de

producción está por debajo de las 20 toneladas/día especificadas en la Directiva 96/61/CE. Otros métodos de producción de grandes cantidades de vidrio para aplicaciones en construcción y automoción se consideran obsoletos en la Unión Europea. Estos productos se denominan vidrio en hojas y vidrio en "lunas", y se discuten brevemente en el Capítulo 1. La mayoría del vidrio plano se produce con una formulación básica al sodio, en la Tabla 2.5 se indica la composición típica del vidrio flotado. El vidrio flotado y el vidrio laminado se producen casi exclusivamente en hornos regenerativos de llama transversal.

Componente	Porcentaje
Oxido de silicio (SiO_2)	72,6
Oxido sódico (Na_2O)	13,6
Oxido cálcico (CaO)	8,6
Oxido magnésico (MgO)	4,1
Oxido de aluminio (Al_2O_3)	0,7
Oxido potásico (K_2O)	0,3
Trióxido de azufre (SO_3)	0,17
Materias primas minoritarias (modificadores del color y eventuales impurezas de las materias primas)	Trazas

Tabla 2.5: Composición típica del vidrio plano

2.5.1. El Proceso del Vidrio Plano

El principio básico del proceso de flotación es verter el vidrio fundido en un baño de estaño fundido, y formar una lámina con las caras plano-paralelas, bajo la influencia de la densidad y de la tensión superficial entre el vidrio y el estaño fundidos.

El baño de flotación consiste en una caja de acero apoyada en una carcasa de acero, y revestida con bloques refractarios que contienen el estaño fundido. El baño de flotación es de 55 – 60 m de largo, 4 – 10 m de ancho, y está dividido en 15 – 20 espacios (cajones "Bay"). El baño es hermético y se mantiene una atmósfera inerte y ligeramente reductora mediante la adición de nitrógeno puro y un mínimo porcentaje de hidrógeno para conseguir esa inertización. Esto es esencial para evitar la oxidación de la superficie del estaño, que generaría compuestos volátiles que podrían caer sobre la superficie del vidrio. Se utiliza estaño fundido como líquido del baño ya que se trata de la única sustancia que se mantiene líquida y sin una presión de vapor significativa a lo largo del rango de temperatura requerido.

El vidrio fundido fluye desde el horno por un canal con revestimiento refractario, que puede calentarse para mantener la temperatura correcta del vidrio. Al final del canal, el vidrio se vierte sobre el baño de estaño a través de un labio refractario especial (labio de vertido), que asegura la correcta expansión de la masa de vidrio. El caudal de vidrio se controla mediante un obturador refractario suspendido en el canal (el "tweel" frontal). Cuando el vidrio entra en contacto por primera vez con el estaño, la temperatura del metal es de unos 1000 °C y se enfriá a unos 600 °C a la salida del baño. A medida que pasa por encima de la superficie del baño, el vidrio desarrolla un espesor uniforme y se hace casi perfectamente plano.

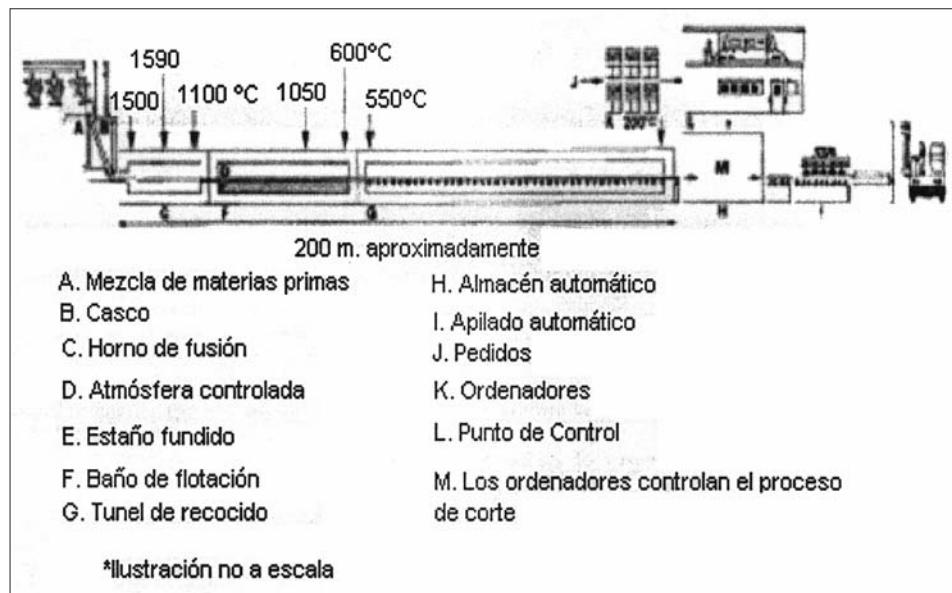


Figura 2.6: Proceso de Vidrio Flotado

Dentro de la cuba de flotación hay varios pares de ruedas dentadas (top rollers) refrigerados por agua, ajustables en altura, penetración y ángulo. Estos rodillos cogen la hoja de vidrio por ambos bordes mediante ruedas dentadas y la estiran a la largo y a lo ancho. La velocidad de flujo de vidrio y las velocidades de rotación de las ruedas dentadas ayudan a controlar el espesor del vidrio, normalmente entre 1,5 mm y 12 mm. Para el resto de espesores hasta 25 mm los top rollers son sustituidos por barreras de grafito para encauzar la masa de vidrio.

A la salida del baño de flotación, la lámina de vidrio es extraída mediante rodillos y se pasa a través de un túnel de recocido a temperatura controlada. Al inicio del túnel de recocido, se pulveriza con SO₂ por la parte inferior de la lámina, para endurecer y proteger la lámina de vidrio del contacto de los rodillos. El túnel de recocido está dividido en secciones en las que hay calentamiento y refrigeración directa o indirecta por convección forzada y natural. El vidrio se enfria así gradualmente desde 600 °C a 60 °C con el fin de controlar las tensiones residuales causadas durante el proceso de conformación. Esta operación requiere tiempo y longitud, ya que desde el vertido del vidrio sobre el baño de flotación a la línea de corte hay una distancia de 200 m de longitud.

La lámina de vidrio enfriado se corta en línea mediante una cuchilla móvil, el ángulo de la cuchilla en relación con la línea depende de la velocidad de la línea (90° si no se mueve). Los bordes de la lámina que tienen marcas de las ruedas dentadas se cortan y se reciclan al horno como casco. Las hojas de vidrio son luego inspeccionadas, empaquetadas, almacenadas y embaladas para su venta o para proceso secundario.

Pueden aplicarse recubrimientos en línea para mejorar las características del producto (Ej. capas metálicas de baja emisividad). Los procesos de aplicación de capas son específicos para cada caso, y el número total de plantas en la industria con instalaciones de aplicación de capas en línea es muy bajo. La lámina de vidrio se recubre mientras está caliente mediante la aplicación en su superficie de compuestos de sílice o estaño que reaccionan con la superficie del vidrio para formar la película requerida. El proceso consiste normalmente en dos etapas de aplicación de capas separadas, una capa inferior a base de silicio y una capa superior separada, como por ejemplo óxido de estaño dopado con flúor. Debido a la naturaleza de los agentes químicos usados, pueden producirse emisiones de gases ácidos y partículas finas, que normalmente se tratan en un sistema de eliminación al efecto.

2.5.2. Proceso de Laminación (Vidrio Grabado y con Hilos Metálicos (armado))

La Figura 2.7 inferior muestra una representación esquemática del Proceso de Vidrio Laminado.

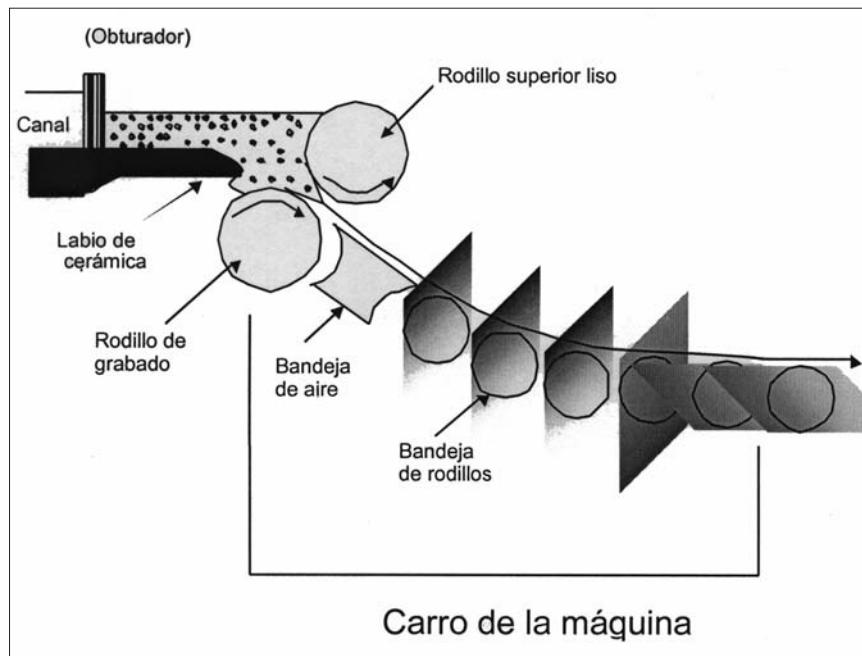


Figura 2.7: Proceso de Vidrio Laminado

El vidrio laminado se forma mediante un proceso continuo de doble rodillo. El vidrio fundido a unos 1000 °C es laminado entre rodillos de acero refrigerados por agua para producir una lámina de espesor y forma superficial controlados.

El vidrio es transportado desde el horno de fusión a un antecuerpo para alcanzar la temperatura requerida antes de pasar por los rodillos. Según la capacidad del horno y la producción deseada, pueden alimentarse una o dos máquinas desde un horno. Los rodillos giratorios laminan el vidrio fundido, de la que sale una lámina de espesor determinado por la separación entre los rodillos. El ancho de una lámina típica es de unos dos metros. Al pasar a través de los rodillos refrigerados por agua, se extrae calor. El control de la temperatura en la interfase es esencial para la correcta operación del proceso y la calidad del producto. Al salir de los rodillos, la lámina es suficientemente viscosa para evitar un estrechamiento significativo y para ser transportada hacia delante sobre rodillos móviles durante unos 2 metros. Ahí se sigue enfriando y se avanza al túnel de recocido a unos 600 °C.

En este proceso, los rodillos cumplen tres funciones: formar la lámina, grabar el dibujo elegido y disipar calor. Los rodillos deben estar mecanizados de forma muy precisa con una perfecta simetría axial y un dibujo uniforme sin ningún defecto en toda la superficie de los rodillos.

La gama de dibujos producida es muy amplia, por lo que deben hacerse cambios frecuentes para poder atender la demanda del mercado. Así, una importante consideración del diseño de las máquinas es la facilidad con la que puede cambiarse un rodillo de grabado. La solución adoptada más frecuentemente es disponer dos laminadoras una junto a la otra en un raíl commutable. De este modo, los nuevos rodillos estampados pueden montarse en la máquina de repuesto y esta estará lista para ser empujada en posición cuando sea necesario el cambio. Esta operación requiere parar el flujo de vidrio mediante una barrera metálica en el canal antes de los rodillos.

El proceso de laminación se ha ampliado a la producción de vidrio con hilos metálicos de refuerzo. Se emplean dos técnicas distintas. En la primera, se utilizan dos canales para suministrar dos flujos de vidrio a la laminadora, pero en el segundo método sólo se requiere un flujo de vidrio y un canal. Se ali-

menta una malla de alambre desde un rollo suspendido sobre la máquina y se guía al denominado lecho de vidrio, formado por el flujo de vidrio que entra en el espacio entre dos rodillos. La especificación, el control y el acondicionamiento de la malla de vidrio son de gran importancia para la calidad del producto.

2.6. Fibra de Vidrio de Filamentos Continuos

[tm18 CPIV, tm8 S2 3.03]

La composición más ampliamente utilizada para producir fibras continuas es el Vidrio-E (E Glass), que representa más de 98% de la producción del sector. La típica composición del Vidrio-E se muestra en la Tabla 2.6. También se utilizan otras composiciones para producir filamentos continuos. Las técnicas de fusión empleadas para estas otras formulaciones son muy específicas y no son generalmente representativas de las técnicas utilizadas en el sector en su conjunto. A los efectos del presente documento sólo se considera la producción de Vidrio-E.

Componente	Porcentaje
SiO ₂	53 - 60
Óxidos alcalinos	< 2
Óxidos alcalinotérreos	20 - 24
B ₂ O ₃	5 - 10
Al ₂ O ₃	11 - 16
ZrO ₂	0
TiO ₂	0 - 3
F ₂	0 - 2
Oxido de hierro	< 1
Oxido de zinc	0
Impurezas	<1

Tabla 2.6: Composición típica del Vidrio-E (E Glass)

La fusión de vidrio para fibra de vidrio de filamentos continuos se realiza normalmente en un horno de recuperación de combustible fósil y llama transversal. Hay también una serie de hornos de oxicombustión en Europa, pero sólo han estado operando durante un periodo limitado. Los hornos regenerativos no se utilizan debido a los tamaños relativamente pequeños de los hornos, y debido a que a la temperatura existente en los regeneradores la condensación de borato sería difícil de controlar. La formulación de vidrio más frecuentemente utilizada en este sector es el Vidrio-E, que tiene un contenido alcalino muy bajo, lo que produce una baja conductividad eléctrica. Actualmente no se considera económicamente viable fundir Vidrio-E utilizando fusión 100% eléctrica.

El vidrio fundido fluye desde el extremo frontal del horno, a través de una serie de canales con revestimiento refractario y calentados por gas, hasta los antecuerpos. En la base de cada antecuerpo hay hileras para permitir que fluya el vidrio. Las hileras son estructuras complejas en forma de caja con una placa de metal perforada (rejilla de la hilera) en la base, con varios cientos de orificios calibrados (tetones de la hilera). La hilera está calentada eléctricamente y su temperatura es regulada de forma precisa en toda la superficie con el fin de obtener un caudal de vidrio fundido constante en cada tetón.

El vidrio que fluye por los tetones es estirado y su diámetro disminuye por la acción de un dispositivo de bobinado a alta velocidad para formar filamentos continuos. Se obtienen diámetros específicos de filamentos del orden de 5 µm a 24 µm regulando de forma precisa la velocidad de estirado lineal (que puede variar entre 5 m/s y 70 m/s). Directamente debajo de la hilera, los filamentos de vidrio sufren un enfriamiento drástico mediante el efecto combinado de aletas de metal refrigeradas por agua, un elevado caudal de aire, y pulverizadores de agua.

Los filamentos se estiran juntos y pasan sobre un rodillo o correa, que aplica una mezcla acuosa, principalmente de emulsión o solución de polímero, a cada filamento. El recubrimiento se denomina también ensimaje o apresto, y tiene una o ambas de las finalidades siguientes: proteger los filamentos de su propia abrasión durante las ulteriores operaciones de manipulación y proceso; y, por lo que respecta a los

refuerzos poliméricos, asegurar una buena adhesión de la fibra de vidrio a la resina. El contenido de aglomerante de los filamentos es normalmente del orden del 0,5 % al 1,5 % en peso. El material de recubrimiento varía según el uso del producto. Los componentes típicos del recubrimiento son: formadores de película (Ej. acetato de polivinilo, almidón, poliuretano, resinas epoxi); agentes ligantes (Ej. silanos organofuncionales); modificadores de pH (Ej. ácido acético, ácido clorhídrico, sales de amonio); y lubricantes (Ej. aceites minerales, surfactantes).

Los filamentos recubiertos se reúnen en haces denominados mechas que son sometidos a ulteriores pasos de proceso, según el tipo de refuerzo que se realice. Las mechas pueden ser sometidas a proceso convencional o directo. En el proceso convencional, las mechas son bobinadas en el manchón giratorio de la bobinadora para formar “ovillos” de hasta 50 kg de peso. Los ovillos, que contienen hasta un 1,5% de aglomerante y hasta un 15% de agua, son etiquetados y pasan a fabricación. Para algunas aplicaciones, los ovillos pueden procesarse húmedos, pero en la mayoría de casos deben pasar por estufas de secado. Las estufas son calentadas mediante gas, vapor, electricidad, o indirectamente mediante aire caliente. Los principales productos son las mechas cortadas, torcidos de hilo, mantas de mechas cortadas, hilos, tejidos, y fibras molidas.

Las mechas cortadas se producen devanando los ovillos y alimentando los filamentos en una máquina con un cilindro de cuchillas giratorias. Las mechas cortadas tienen normalmente una longitud entre 3 mm y 25 mm, y son transportadas a diversos tipos de embalajes de hasta 1 tonelada de peso. Los torcidos de hilo se producen devanando y combinando las mechas de múltiples ovillos, suficientes para conseguir el peso de vidrio deseado por unidad de longitud.

Las mantas de mecha cortada se producen cortando las mechas devanadas de ovillos o torcidos, en cuchillas cilíndricas. Las cuchillas están dispuestas de modo que las mechas cortadas puedan ser colocadas en un transportador móvil de hasta 3,5 m de ancho. Las mechas se pulverizan con un aglomerante secundario, por ejemplo una solución acuosa de acetato de polivinilo o polvo de poliéster saturado. El contenido total de aglomerante está entre el 2% y el 10%. El transportador lleva la manta húmeda a través de una estufa de secado y polimerización, y luego a través de un par de rodillos de compactado antes de bobinar la manta en un manchón. La manta puede hacerse en diversas densidades y anchos, y se empaqueta en cajas con un peso normal de 50 kg.

Los productos de hilo se producen a partir de ovillos secos o húmedos, y el secado de las mechas tiene lugar durante la operación de torsión. El hilo se hace en una máquina de torsión (o retorcadora) que puede albergar hasta 100 ovillos, y puede contener cualquier combinación de distintas mechas. Las mechas se juntan, se trenzan formando un hilo y se bobinan formando una bobina. Se trata de un proceso complejo similar al empleado en la industria textil. Normalmente, la máquina de torsión produce sólo un hilo de una sola mecha pero (aunque es menos común) pueden producirse hilos múltiples.

El velo de fibra de vidrio se produce cortando las mechas devanadas de los ovillos en cuchillas cilíndricas, que alimentan directamente un triturador o envían las mechas a grandes contenedores de espera para su uso posterior. Tras su dispersión en el triturador, las fibras son aplicadas a una cinta transportadora de malla por el método de aplicación húmeda. Una solución acuosa de distintos tipos de resinas, alcohol polivinílico y látex se agrega como aglomerante en un porcentaje de hasta el 20%. La malla lleva el alma a través de una estufa de secado y polimerización antes de bobinar el tejido en un tambor. El velo de fibra de vidrio puede tener diversas densidades y anchuras.

Los hilos cortados se hacen moliendo ovillos o mechas cortadas a longitudes de 50 – 300 µm. Los hilos cortados son transportados a una serie de embalajes, con pesos desde 20 kg hasta 1 tonelada.

Las mechas cortadas, los torcidos y las mantas de filamento continuo pueden asimismo producirse mediante proceso directo. Las mechas cortadas se producen introduciendo directamente la mecha, tras su recubrimiento, en una cortadora de alta velocidad. Las mechas se recogen y, según el uso del producto, se embalan en húmedo o se secan. Los torcidos directos se producen utilizando una placa de hilera con un

número determinado de orificios de distintos diámetros, correspondientes al producto deseado. Los filamentos pueden recubrirse y secar el retorcido de forma normal. La manta de filamento continuo se produce colocando las mechas en un transportador móvil y pulverizándolas con un aglomerante acuoso o en polvo. Se utiliza un dispositivo especial para asegurar la correcta colocación de los filamentos en el transportador. La manta pasa a través de una estufa de secado y de rodillos de compactado, antes de bobinarse en un manchón y embalarse.

2.7. Vidrio Doméstico

[tm27 Domestic]

Este sector es uno de los más diversos de la Industria del Vidrio, y engloba una amplia gama de productos y procesos. Los procesos van desde sofisticadas actividades de producción manual de vidrio al plomo decorativo hasta métodos a gran escala y con alto nivel de mecanización utilizados para productos de consumo de bajo valor. La mayoría del vidrio doméstico se fabrica con vidrio sodocálcico con formulaciones similares a las del vidrio para envases. No obstante, las formulaciones son generalmente más complejas debido a requisitos específicos de calidad y a la mayor variedad de los procesos de conformación. Al igual que el vidrio para envases, pueden agregarse agentes colorantes en el horno o en la alimentación. Los otros tipos principales de vidrio doméstico son:

1. Vidrios opalinos (opacos) al fluoruro o fosfato.
2. Vidrio al plomo puro y vidrio al plomo, con definiciones oficiales (formulación y propiedades) según la Directiva 69/493/CEE.
3. Vidrio de borosilicato con boro, particularmente adaptado para equipo de cocina debido a su bajo dilatación de dilatación térmica.
4. Vitrocerámica para equipo de cocina con un coeficiente de dilatación aún más bajo.

La amplia gama de productos y procesos significa que prácticamente todas las técnicas de fusión descritas en la Sección 2.3 encuentran aplicación en este sector, desde hornos de crisoles a grandes hornos regenerativos. A diferencia de la producción de envases, el vidrio recuperado externo no se utiliza ampliamente debido a las restricciones de calidad, pero el vidrio de desecho interno se aprovecha de forma universal.

Los procesos de moldeo se engloban en dos categorías, proceso automático y proceso manual o semiautomático. El proceso automático es similar al del Sector de Vidrio para envases. El vidrio del horno es alimentado a través de uno o más antecuerpos a la moldeadora, en la que los artículos se moldean mediante moldes. La técnica de moldeo precisa depende de las dimensiones del producto fabricado. Las cuatro técnicas principales son: prensado y soplado; soplado y soplado; prensado; y centrifugado. Las técnicas de prensado y soplado, y de soplado y soplado, son esencialmente las mismas que para el sector de Vidrio para Envases, por lo que no vuelven a describirse aquí, aunque el diseño de las máquinas y las condiciones operativas (velocidad, requisitos de calidad) varían.

El proceso de prensado es relativamente simple y se utiliza para artículos que son poco profundos y en los que la boca es más ancha o de igual ancho que la base. Consiste en prensar una gota de vidrio caliente entre un molde y un émbolo. La temperatura del vidrio varía según la formulación, pero para el vidrio sodocálcico es normalmente de 1150 °C.

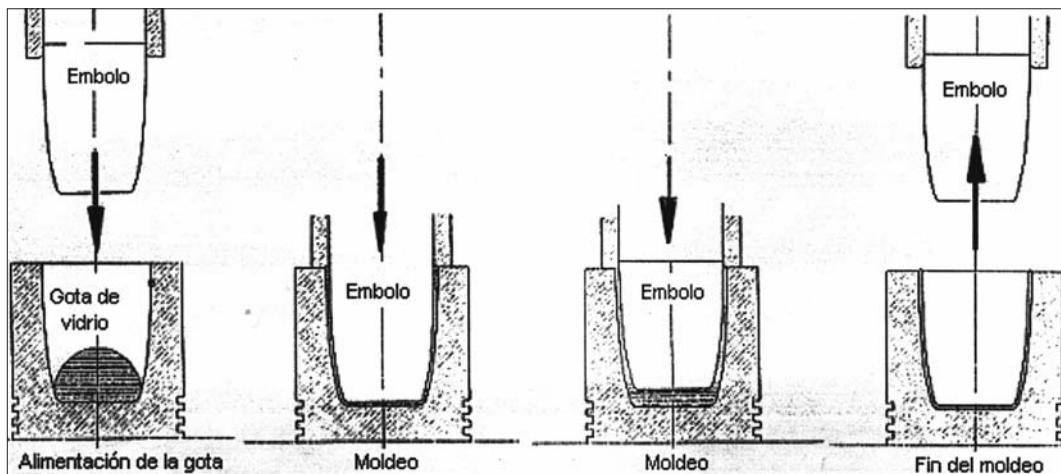


Figura 2.8: El proceso de prensado para la formación de artículos de vidrio

El proceso de centrifugado se utiliza para producir artículos circulares como platos y boles poco hondos. Se coloca una gota de vidrio caliente en el molde, que luego se hace girar, y el artículo se forma por la fuerza centrífuga resultante.

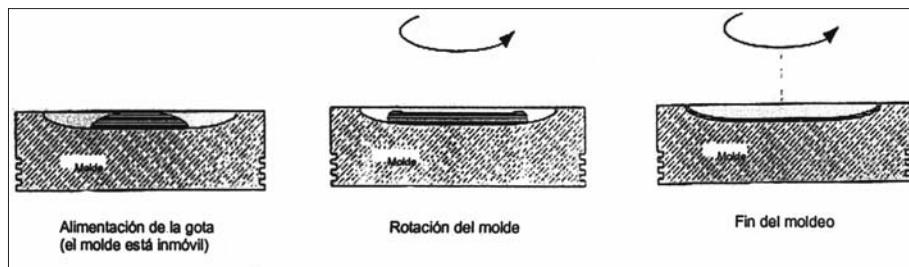


Figura 2.9: Proceso de centrifugado para la formación de artículos de vidrio

Los artículos moldeados se acaban generalmente al fuego y se pulen para obtener la calidad de superficie requerida. Con frecuencia se requieren temperaturas muy elevadas, que se obtienen mediante combustión de oxi-gas o en algunos casos de oxígeno-hidrógeno. Estos procesos tienen la ventaja de un menor consumo específico de energía, fácil uso y reducción de los volúmenes de escape. Tras la combustión, los artículos pasan a través un túnel de recocido y se les puede aplicar recubrimientos superficiales. Las operaciones de recocido y de aplicación de capas en frío son comparables a las del vidrio para envases y no se describen en mayor detalle. En algunos casos, los artículos no pasan a través de un túnel de recocido, sino a través de un horno de temple con el fin de aumentar su resistencia a los impactos mecánicos y térmicos. La producción de ciertos artículos comporta la unión independiente de dos o más piezas tras la refusión local. Esto se aplica a los cuerpos y pies para los vasos y a las asas para tazas y vasos. Estos artículos se fabrican separadamente mediante prensado, estirado o extrusión. Los cuerpos de vasos se estiran a menudo a partir del bulbo del vidrio y sólo el pie se añade separadamente.

Para artículos fabricados a mano, el vidrio es recogido por una persona con un tubo hueco, directamente desde el horno o desde un alimentador. Se crea un cuerpo hueco pequeño (paraison) aplicando un pequeño soprido al tubo, y la forma se moldea luego girando un molde de madera o metal. Los artículos se llevan luego a un túnel de recocido para eliminar las tensiones internas, y se acaban al fuego, se pulen y se recalientan. En producción semiautomática algunos pasos del proceso (recogida, moldeo y manipulación) se realizan con máquinas o robots. En general, la fabricación de artículos a mano sólo está sometida a las normas de la IPPC cuando se realiza en una instalación en la que se realizan otras instalaciones de producción de vidrio.

Tras la producción de los artículos básicos, pueden ser sometidos a una o más operaciones de acabado en frío. Algunas de ellas se detallan a continuación.

El corte consiste en grabar precisas formas preseleccionadas en los artículos de vidrio en bruto mediante ruedas impregnadas con diamante. Este proceso puede realizarse manual o automáticamente según el producto. El agua (en ocasiones dosificada con lubricante, etc.) se utiliza como refrigerante para corte y también elimina las finas partículas de vidrio producidas. El agua es tratada y evacuada o reciclada. Los bordes de los artículos se pulimentan y pulen en ocasiones mediante técnicas similares pero menos especializadas.

El corte de vidrio produce una superficie gris e inacabada en el vidrio. La superficie del vidrio regresa a su aspecto original mediante inmersión en un baño de pulido de ácidos clorhídrico y sulfúrico. Los ácidos alisan la superficie del vidrio, ya que las zonas rugosas se disuelven más rápidamente debido a su mayor superficie. En la superficie del vidrio se forma una “piel” blanca (compuesta de sulfato de plomo). Tras enjuagar con agua caliente, el vidrio vuelve a quedar en un estado brillante.

Del baño de pulido se emiten vapores de HF y SiF₄. Estos vapores se tratan en columnas de lavado. Durante esta operación, se forma ácido hexafluorosilícico (H₂SiF₆), con concentraciones típicas de hasta un 35%, y luego se neutraliza el agua de lavado ácida. Como alternativa, puede recuperarse el H₂SiF₆ y utilizarlo como materia prima en la industria química. El agua de enjuague ácida requiere asimismo neutralización periódica. Se están desarrollando técnicas alternativas al pulido con ácido, como por ejemplo pulido mecánico, así como pulido a alta temperatura con llamas o láseres.

Existe una gran variedad de otras técnicas que pueden usarse para crear dibujos atractivos. Entre ellas se incluyen: decoración con esmaltes, satinado o mateado por arenado o ataque con ácido, y grabado. Los volúmenes y las emisiones asociadas de estas operaciones son pequeños en comparación con las etapas del proceso principal.

2.8. Vidrio Especial

[tm25 Special, tm1 UKDoE, tm21 Schott]

El Sector del Vidrio Especial es extremadamente diverso, y cubre una amplia gama de productos que pueden diferir considerablemente en cuanto a su composición, método de fabricación y uso final. Asimismo, podría considerarse que muchos de los productos se superponen con los de otros sectores, especialmente el Sector de Vidrio Doméstico en los vidrios de borosilicato. El vidrio para tubos de rayos catódicos y el vidrio de borosilicato representan alrededor del 70% de la producción de vidrio especial, y la mayoría de los otros productos tienen volúmenes de producción relativamente bajos y muchas veces están considerablemente por debajo del umbral de 20 toneladas/día. No obstante, muchos de estos productos de bajo volumen se fabrican en instalaciones en las que la producción total de todas las operaciones supera esta cifra. La Tabla 2.7 indica las composiciones de los principales tipos de vidrio. Esta sección detalla los principales métodos de producción empleados en el sector.

Sin embargo, debido a la diversidad del sector y a la amplia gama de técnicas de fusión empleadas, los bajos volúmenes de producción se traducen en que la mayoría de hornos son bastante pequeños. Las técnicas más comunes son los hornos recuperativos, los hornos de oxi-gas, los hornos de fusión eléctricos y los hornos diarios. En algunos casos se utilizan asimismo hornos regenerativos, por ejemplo en la producción de vidrio para tubos de rayos catódicos y de vidrio soluble. Cabe resaltar que las temperaturas de fusión de los vidrios especiales pueden ser más elevadas que las de las composiciones más convencionales para producción en masa. En particular, los tubos de rayos catódicos, el vidrio de borosilicato y las cerámicas de vidrio requieren temperaturas de fusión de más de 1650 °C. Estas altas temperaturas y formulaciones complejas pueden conducir a mayores emisiones medioambientales por tonelada producida que, por ejemplo, los productos de vidrio sodocálcico. La baja escala de producción combinada con temperaturas más elevadas significa asimismo que la eficiencia energética es por lo general menor, y las vidas útiles de los hornos son también más cortas en este sector.

Los altos requisitos de calidad de ciertos productos como el vidrio óptico y el vidrio cerámico sig-

nifican que es necesario construir (o recubrir) con platino los componentes a partir de la sección de afinado, con el fin de evitar la contaminación del producto.

Al igual que en otros sectores, tras la fusión y el afinado el vidrio fundido fluye desde el horno, a lo largo de antecuerpos a temperatura controlada, a aparatos de moldeo. Las principales técnicas empleadas en el sector son:

- a) Producción por prensado y soplado (vidrio de borosilicato, vajillas y productos para cocina)
- b) Proceso de molde giratorio (post-molde) (vidrio de borosilicato, lámparas)
- c) Proceso de soplado (o soplado-fraguado) (vidrio de borosilicato, vidrio doméstico)
- d) Laminación (vidrio plano cerámico)
- e) Prensado (vidrio para tubos de rayos catódicos y lámparas)
- f) Proceso de lámina (bombillas)
- g) Proceso de centrifugado (vidrio de borosilicato)
- h) Extrusión de tubos, procesos Danner y Vello (tubos de vidrio incluida iluminación)
- i) Moldeo (bloques de vidrio óptico y algunos productos especiales)
- j) Proceso de estirado (inferior para vidrio en película fina como vidrio para pantallas, superior para vidrio de borosilicato)
- k) Flotación (vidrio de borosilicato)
- l) Disolución (soluciones de vidrio soluble)

La producción mediante prensado-soplado, y soplado-soplado es esencialmente la misma que se ha descrito para el Sector de Vidrio Doméstico. El proceso de laminación utilizado para producir artículos como hornillos de cerámica para cocinas es una versión a menor escala del proceso descrito para el Sector de Vidrio Plano, pero con rodillos lisos. Estos procesos no se vuelven a describir aquí, por lo que debe hacerse referencia a secciones anteriores.

En el proceso de prensado, el vidrio está en contacto con todas las partes del material del molde metálico. El molde de prensado consta de tres partes: el molde hueco; un émbolo, que se acopla en el molde, dejando un espacio que determina el espesor de la pared del vidrio; y una junta de estanqueidad que guía el émbolo cuando se extrae del molde. Se alimenta una gota de vidrio al molde, y se prensa hidráulica o neumáticamente por el émbolo guiado por el anillo hasta que el vidrio está prensado en todos los puntos del molde. El émbolo y el molde extraen gran parte del calor del vidrio, y tras la solidificación se extrae el émbolo. La mayoría de prensas operan sobre giratorios que normalmente tienen entre 4 y 20 moldes (máximo 32, el valor más común para vidrio para tubos de rayos catódicos es de 11). El giratorio lleva el vidrio paso por paso a través de las etapas de mezcla, prensado, enfriamiento y aspiración.

Las bombillas pueden producirse mediante el proceso de lámina. Se forma una lámina de vidrio laminando vidrio fundido entre dos rodillos refrigerados por agua. Al abandonar los rodillos, la lámina de vidrio es transportada a través de la máquina sobre una serie de placas con orificios, que forman una lámina continua perforada con agujeros. A medida que avanza la lámina, una cadena continua de cabezales de soplado la abordan desde arriba, coincidiendo cada cabezal de soplado con un agujero en la lámina. Un soprido del cabezal de soplado sopla el vidrio a través del orificio y el vidrio se moldea en forma de bombilla dentro de un molde giratorio, que se acopla y se cierra alrededor del mismo desde abajo. Más adelante en la lámina, la bombilla formada se extrae de su molde, se enfria con aire y luego se separa de la lámina y se transfiere a una cinta transportadora. Ésta lleva las bombillas a través de un túnel de recocido, y al enfriamiento, inspección y embalaje. Pueden conseguirse ritmos de producción superiores a 1.000 bombillas por minuto.

La extrusión puede usarse para vidrios con una curva de viscosidad con una pendiente pronunciada, o para vidrios con tendencia a cristalizar, para producir artículos con tolerancias dimensionales muy precisas. Es un método económico de fabricar diversos tipos de perfiles macizos o huecos con secciones transversales de arista viva para uso industrial. Utilizando métodos de extrusión por laminación, pueden combinarse dos o tres tipos de vidrios para producir, por ejemplo, componentes revestidos con vidrio químicamente resistente.

El método más ampliamente usado para el estirado continuo de tubo de vidrio es el proceso Danner. Una mecha continua de vidrio fundido fluye a un núcleo refractario ligeramente angulado que gira lentamente, denominado manchón de Danner. En el extremo inferior del manchón se forma una bombilla hueca, que se estira para formar el tubo. Se sopla aire a través del cuerpo del manchón hueco manteniendo un espacio hueco en el vidrio. Tras ser redirigido horizontalmente, el tubo en fase de solidificación es transportado sobre un carril de rodillos hasta la unidad de arrastre, después de la cual se corta en longitudes de 1,5 m, o a veces más. Estas máquinas pueden producir más de 3 m por segundo de tubo de vidrio.

El proceso Vello es el segundo proceso más ampliamente usado y tiene prácticamente la misma velocidad de producción que el proceso Danner. El vidrio del horno fluye a lo largo del antecuerpo y hacia abajo a través de un orificio (el anillo), y el espacio hueco del vidrio es mantenido por un tubo con una abertura cónica (la campana) situada dentro del anillo. El tubo todavía blando se redirige horizontalmente y se estira a lo largo de un carril de rodillos, se enfriá y corta como en el proceso Danner.

Una variación del proceso Vello es el proceso de estirado inferior, que puede usarse para producir tubos con diámetros de hasta 360 mm. El vidrio se estira hacia abajo a través de una cámara de vacío, y pasa a través de un diafragma de iris sellado, un obturador circular que puede ajustarse a distintas aperturas. Un cuarto proceso es el proceso de estirado superior, en el que el tubo de vidrio se estira verticalmente hacia arriba desde un vaso giratorio. La zona de estirado está protegida por un cilindro cerámico giratorio, un extremo del cual está sumergido en el vidrio. El espacio hueco se forma mediante un chorro de aire colocado bajo la superficie del vidrio. Esta técnica es particularmente útil para producir tubos con paredes gruesas y grandes diámetros.

El vidrio óptico puede colarse en bloques o extruirse en cilindros para formar las piezas en bruto, que se venden para su proceso ulterior. Los moldes son normalmente de materiales refractarios.

El vidrio soluble (silicato sódico, relación Si:Na 2 – 3,5) se fabrica fundiendo arena y carbonato sódico en un horno de combustible fósil. Puede fabricarse un derivado de silicato de potasio utilizando potasa (carbonato potásico). El horno es muy similar a un horno convencional y puede ser regenerativo o de recuperación según su tamaño. El horno es normalmente más corto que un horno convencional con un tiempo de estancia más corto, dado que no es necesario refinar el vidrio. El vidrio fundido fluye desde el extremo del horno (normalmente no son necesarios antecuerpos) y es enfriado inmediatamente, normalmente mediante contacto con agua o un transportador refrigerado por agua. El vidrio puede venderse como sólido pero lo más frecuente es que se disuelva en agua a temperatura y presión elevadas (el vidrio es sólo ligeramente soluble a presión atmosférica) dando una solución.

El vidrio soluble puede también producirse mediante el proceso hidrotérmico, que comporta la disolución directa de arena en hidróxido sódico para producir una solución de silicato cristalino en un paso precisamente controlado. La reacción se produce en autoclaves especialmente diseñados para soportar las condiciones agresivas. Este proceso no se considera como un proceso del vidrio, pero puede que deba ser tenido en consideración en un permiso para una instalación en la que se realicen ambas actividades.

Material	Vidrio para tubos de rayos catódicos		Tubo de vidrio		Vidrio de borosilicato		Otros vidrios para iluminación		Vitrocerámica		Vidrio al cuarzo		Vidrio óptico		Otros Ej. diodos		Vidrio soluble	
	Panel	Embudo	Alcalino-téreo	Borosilicato	Ej. material de laboratorio	Vidrio Opaco	Lámpara				Bóveda de Boro	Bóveda de Flúor					a) silicato Na b) silicato K	
SiO ₂	60 - 63	53 - 55	70	70 - 81	70 - 81	67,5	73 - 75	60 - 64	99,9	61,7					35	66 - 88		
Al ₂ O ₃	2 - 3,4	1 - 5,2	4	2,3 - 5,5	2,3 - 5,5	5	1 - 4	10 - 20	0,005	0,3 - 3,0	15				0,1			
Fe ₂ O ₃				0,01 - 0,03	0,01 - 0,03	0,15									0,03			
CaO	0 - 3,2	0,9 - 3,8	4	0,01 - 1	0,01 - 1	9,4	0,5	0,5 - 7,0	0,001	0 - 3,0					0,008			
PbO		21 - 23													60	<0,0002		
MgO	0 - 1,2	0,6 - 2,2	2	0,01 - 0,5	0,01 - 0,5	0,5	0,0 - 1,0	0,001							0,008			
Na ₂ O	6,6 - 9,4	5,8 - 6,7	12,5	3,5 - 6,5	3,5 - 6,5	13,6	3 - 4	0,5 - 10	0,001	0 - 5,0					20 - 34(a)			
K ₂ O	6,6 - 8,4	7,8 - 8,1	2,5	0,5 - 1,5	0,5 - 1,5	1,8	1,5 - 2,5			12 - 18					5,0	27 - 32(b)		
SO ₃						0,2									0,015			
F						4,0									35			
B ₂ O ₃		1	8 - 13	8 - 13		12 - 17												
BaO	8,3 - 13	0 - 2,5	4				1,0 - 2,0			6 - 20					0 - 10	20		
ZnO										0,5 - 6,0								
SrO	2,2 - 8,8	0 - 0,5																
ZrO	0 - 2,3	0 - 0,2		0,01 - 1	0,01 - 1					1 - 2,0					20			
P ₂ O ₅															3,0 - 4,0			
LiO ₂															1,5			
TiO ₂																		

Tabla 2.7: Composición química de los principales productos del Sector de Vidrio

Algunas de las composiciones del vidrio presentan grandes variaciones de un producto a otro, por lo que las cifras indicadas son sólo orientativas.

2.9. Lana Mineral

[tm26 EURIMA, tm8 S2 3.03]

La fabricación de lana mineral consiste en las siguientes etapas: preparación de materias primas, fusión, fibrado del material fundido, aplicación de aglomerante, formación de la manta de producto, polimerización, enfriamiento y acabado del producto. La lana mineral puede dividirse en dos categorías principales: lana de vidrio; y lana de roca o lana de escorias. Los productos se utilizan esencialmente en las mismas aplicaciones y se diferencian principalmente en las materias primas y métodos de fusión. Tras la etapa de fusión, los procesos y aspectos medioambientales son esencialmente idénticos. Las formulaciones características de la lana mineral se indican en la Tabla 2.8 siguiente.

Lana Mineral	SiO_2	Óxidos Alcalinos	Óxidos Alcalino-térreos	B_2O_3	Óxidos de hierro	Al_2O_3	TiO_2	P_2O_5
Lana de Vidrio	57 - 70	12 - 18	8 - 15	0 - 12	<0.5	0 - 5	Trazas	0 - 3
Lana de Roca	38 - 57	0,5 - 5	18 - 40	Trazas	0,5 - 12	0 - 23	0,5 - 4	0 - 3
Lana de Escorias	38 - 52	0,5 - 3	30 - 45	Trazas	0 - 5	5 - 16	<1	Trazas

Tabla 2.8: Composiciones típicas de las lanas minerales

2.9.1. Lana de Vidrio

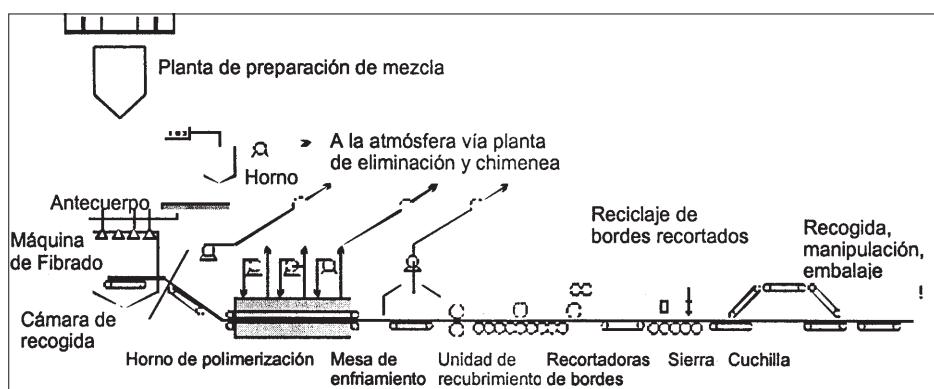


Figura 2.10: Una planta típica de lana de vidrio

Las materias primas para la fabricación de lana de vidrio se suministran con camiones cisterna y son transportadas neumáticamente a tolvas de almacenaje. Cada proceso utiliza una gama de materias primas, y la formulación precisa de la mezcla puede variar considerablemente de un proceso a otro. Entre las materias primas básicas para la fabricación de lana de vidrio se incluyen arena, carbonato sódico, dolomita, piedra caliza, sulfato sódico, nitrato sódico, y minerales que contienen boro y alúmina.

La mayoría de procesos utilizan asimismo casco como materia prima. Se trata de vidrio fragmentado, que se ha obtenido enfriando en agua la corriente fundida del horno cuando se interrumpe la operación de fibrado. El vidrio de desecho de proceso tiene la misma formulación precisa que el producto final, y se recicla directamente al horno. Otras formas de vidrio recuperado, como vidrio de botellas y platos, se utilizan cada vez más como materia prima. Este tipo de material es más difícil de reciclar y su uso depende fuertemente del coste, composición, pureza y consistencia del suministro. Varios fabricantes reciclan asimismo desechos fibrosos procesados y el polvo recogido de la corriente de gas residual del horno de fusión.

La naturaleza fibrosa de gran parte de los desechos hace impracticable su reciclaje sin tratamiento previo. Las materias primas del horno de vidrio se cargan en forma de polvo o gránulos, por lo que el mate-

rial de desecho debe ser triturado o peletizado antes de la mezcla. Esto se consigue normalmente mediante alguna forma de operación de molienda. El producto de desecho y los desechos filtrados contienen niveles considerables de aglomerante orgánico. En un horno de vidrio, el contenido de carbono de los residuos presenta una serie de problemas potenciales que incluyen una menor transferencia de calor, formación de espuma, desestabilización de las condiciones de fusión, y alteración de la química del horno. Estos problemas pueden mitigarse pero hay un límite en la cantidad de residuos que pueden reciclarse en el horno. Además, puede ser necesario agregar nitrato sódico o potásico como agente oxidante, y la descomposición de estas materias primas puede aumentar de forma considerable las emisiones de óxidos de nitrógeno.

Las diversas materias primas se pesan inmediatamente y se mezclan para producir una mezcla de formulación precisa. La mezcla es luego transferida a una tolva de almacenaje intermedia antes de su transferencia al horno.

El horno (con algunas raras excepciones) será un horno eléctrico, un horno de recuperación tradicional a gas, o menos frecuentemente un horno de oxi-gas. Estas técnicas se describen en la Sección 2.13 anterior.

Una corriente de vidrio fundido fluye desde el horno a lo largo de un antecuerpo con revestimiento refractario, y se vierte, a través de una serie (normalmente de 1 a 10) de hileras de un solo orificio, a centrifugadoras especialmente diseñadas. El fibrado primaria por la acción centrífuga de la centrifugadora con posterior atenuación por los gases de combustión calientes de un quemador circular. Esto forma una cortina circular de fibras de diversas longitudes y diámetros entrelazadas de forma aleatoria. El velo pasa a través de un anillo de pulverizadores de aglomerante que pulverizan una solución de aglomerante a base de resina fenólica y aceite mineral sobre las fibras, para conferir integridad, resistencia, durabilidad y calidad de manipulación al producto acabado.

La fibra recubierta con resina es llevada mediante aspiración a un transportador móvil para formar un colchón de fibras. Este colchón pasa a través de un horno con combustión a gas a unos 250 °C, que seca el producto y polimeriza el aglomerante. El producto es luego enfriado con aire y se corta al tamaño antes de su embalaje. Los recortes de los bordes pueden reintroducirse en la manta de fibra, o pueden combinarse con el excedente de producto para formar un producto de lana suelta. Algunos productos se producen sin polimerización en la estufa y, por ejemplo, se polimerizan en microondas, se prensan en caliente, se dejan sin polimerizar o no llevan aglomerantes. Asimismo, ciertos productos laminados se revisten mediante la aplicación de un recubrimiento, como hoja de aluminio o tejido de vidrio, que se aplica en línea con un adhesivo.

Se pulveriza agua en gran parte de los conductos de los procesos de acabado, para evitar la acumulación de fibra y material resinoso, que podría causar incendios o bloqueos, y para retirar los compuestos atrapados de los gases de combustión. También se utiliza agua para limpiar el transportador de recolección y otras partes de la planta. El sistema de agua de proceso es generalmente un circuito cerrado, siendo recogida, filtrada y reutilizada para pulverizadores de conductos, agua de limpieza y dilución del aglomerante. En la Figura 2.11 siguiente se muestra un típico sistema de agua de proceso.

A partir de la fibra producida se fabrican diversos productos secundarios. Entre ellos se incluyen lana aislante granulada para instalaciones de soplado, lana sin curar embalada para suministro a clientes para su proceso posterior, y productos laminados o revestidos. La fabricación de coquillas es un importante producto secundario que normalmente se fabrica desviando lana sin curar del proceso principal para su moldeo por prensado. Alternativamente, la lana puede bobinarse en manchones calientes retráctiles para formar el ánima y ser termoprocесada para formar la pared exterior antes de su transferencia a una etapa de polimerización global.

El aglomerante se prepara mezclando la resina parcialmente polimerizada con ciertos aditivos que mejoran la eficacia de aplicación, promueven la adhesión de las resinas a la lana, suprinen la formación de

pollo, confieren resistencia al agua y facilitan la dilución del aglomerante. El aglomerante se diluye con una cantidad sustancial de agua (agua de proceso si está disponible) antes de su aplicación en la manta.

La resina más comúnmente utilizada es un producto de termofijación de fenol, formaldehído y un catalizador. La resina es a base de agua y normalmente contiene hasta un 50% de sólidos. En el Capítulo 4 se da una descripción más detallada de la química del aglomerante. La resina puede ser importada de fabricantes especializados o puede fabricarse in situ por el fabricante de la lana mineral. La producción de resina in situ consiste normalmente en un proceso discontinuo en el que las materias primas se hacen reaccionar bajo control térmico para dar el grado deseado de polimerización y sólidos. La fabricación de resinas se considera un proceso químico y no está cubierto por este documento.

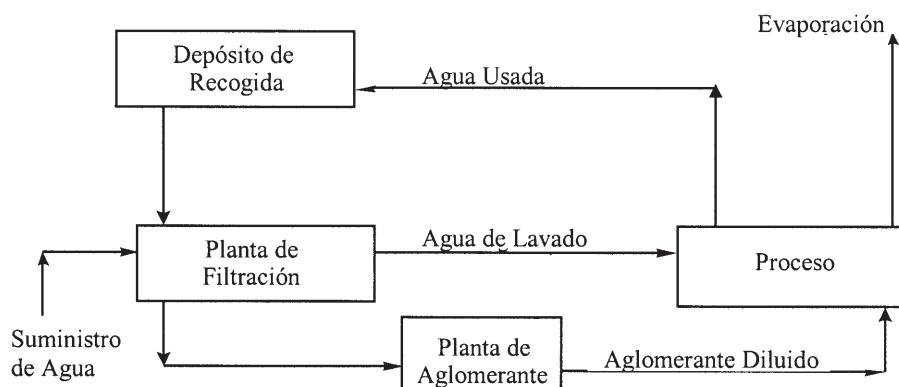


Figura 2.11: Un circuito típico de agua de proceso para lana mineral

2.9.2. Lana de Roca

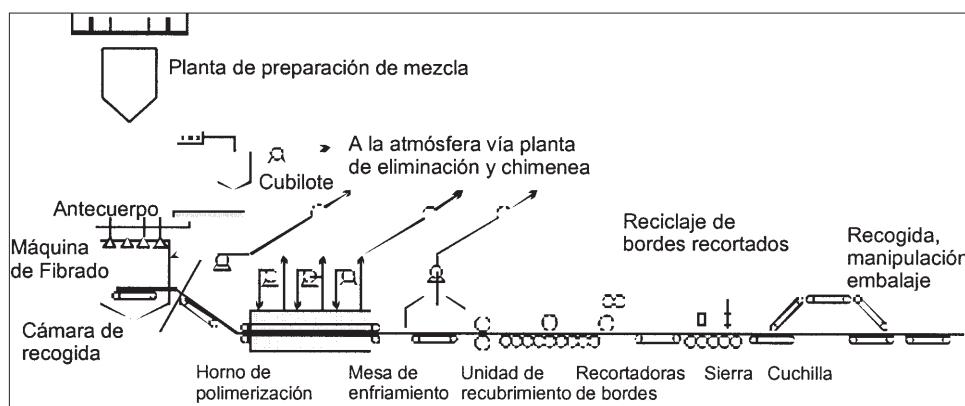


Figura 2.12: Planta típica de lana de roca

La lana de roca tradicional se elabora fundiendo una combinación de roca de alúmina y silicato (normalmente basalto), escoria de alto horno, y piedra caliza o dolomita. La mezcla puede también contener residuos reciclados de proceso o de producto. La técnica de fusión más común es el cubilote de viento caliente con combustión de coque. El cubilote consiste en una camisa cilíndrica de acero que puede estar revestido con material refractario y cerrado en la parte inferior. Toda la superficie del cubilote está refrigerada por agua mediante un circuito convectivo abierto de agua de refrigeración.

Las materias primas y el coque se cargan en la parte superior del cubilote en capas alternadas, o a veces se mezclan. En la zona de combustión del cubilote se inyecta aire, en ocasiones enriquecido con oxígeno, a 1 o 2 metros del fondo. Esta es la parte más caliente del horno, a unos 2000 °C. El material fundido se acumula en el fondo del cubilote y fluye por una ranura y un canalón corto situado sobre la máquina de hilar. El basalto, y en menor medida la escoria de alto horno, contiene hierro en forma de Fe^{3+} y Fe^{2+} . En las condiciones reductoras de algunas zonas del cubilote de viento caliente, el hierro férrico/ferro-

so se reduce a hierro metálico, que se recoge en el fondo del cubilote, y dañaría la costosa máquina de hilar si se dejara acumular hasta el punto de que fluyera por la ranura. Para evitar esto, el hierro se drena periódicamente, perforando la parte inferior de la base curvada del cubilote de viento caliente.

En los cubilotes de viento caliente, el material fibroso o polvoriento sería transportado fuera por la parte superior del cubilote, o afectaría negativamente la porosidad del lecho e interferiría con el flujo de aire caliente. La solución aceptada para este problema es moler el material y producir briquetas de tamaño comparable al de las otras materias primas. El cemento es el aglomerante habitual de las briquetas, pero puede producir mayores emisiones de dióxido de azufre debido al azufre del cemento. No obstante, el briquetado proporciona otras ventajas, como por ejemplo un menor consumo energético y la capacidad de agregar otras materias finas a la mezcla, particularmente otros residuos como arena de fundición.

El material fundido cae sobre las ruedas de la máquina de hilar, que giran rápidamente, y es lanzando en un pulverizado fino, produciendo fibras. Se sopla aire desde detrás de las ruedas giratorias para estirar las fibras y para dirigirlas a la cinta de recepción, formando un colchón. Se aplica una solución acuosa de resina fenólica a las fibras mediante una serie de pulverizadores existentes en la máquina de hilar. El transportador de recepción bajo el cual se crea un fuerte depresión tiene tres funciones: arrastra la fibra sobre la cinta, extrae el aire contaminado de la cámara de fibrado, y ayuda a distribuir el aglomerante fenólico por todo el colchón. La resina fenólica proporciona resistencia y forma al producto, igual que en un aislante de fibra de vidrio. La manta primaria se estratifica para obtener la densidad por unidad de superficie requerida para el producto. Puede usarse un proceso de formado de cámara larga que genera el peso específico del producto en una sola etapa, aunque es mucho menos común.

La manta pasa a través de un cubilote de combustible fósil a unos 250 °C, que fija el espesor del producto, lo seca y polimeriza el aglomerante. El producto se enfriá luego con aire y se corta al tamaño deseado antes de su embalaje. También es posible fabricar coquillas para tubos y algunos productos secundarios en el modo descrito para el proceso de lana de vidrio en la Sección 2.9.1.

Puede pulverizarse agua en el conducto para evitar la acumulación de resina y fibra, para reducir el riesgo de incendios y para eliminar los compuestos atrapados en los gases de combustión. El agua se utiliza asimismo para diversas operaciones de limpieza. Al igual que en la producción de aislantes de fibra de vidrio, el agua de proceso se recoge, filtra y reutiliza.

La lana de roca puede asimismo producirse mediante hornos de llamas y hornos de arco eléctrico sumergido. Las otras operaciones de proceso, incluido el fibrado, son idénticas. El diseño y el funcionamiento de los hornos de llamas utilizados para la fabricación de lana de roca y de lana de escorias es básicamente comparable al de los hornos de llamas utilizados para la fabricación de lana de vidrio. El horno consiste en una cuba refractaria calentada mediante quemadores de combustible fósil, con llama transversal o de herradura. Son posibles superficies de fusión de hasta 100 m². Nuevamente, el hierro metálico es reducido desde las materias primas y puede ser necesario sangrar el hierro, por ejemplo a través de un orificio situado en el fondo del horno.

Un horno de arco eléctrico sumergido para la fabricación de lana de vidrio consiste en una camisa de acero, que puede tener revestimiento refractario y que va refrigerada por aceite o agua. Los electrodos están sumergidos en la masa fundida desde la parte superior del horno, suministrando energía para fundir mediante calentamiento resistivo. Las materias primas se introducen desde arriba para crear una capa de material sobre la superficie de fusión (parte superior fría). No obstante, debido a la disposición de los electrodos, hay siempre un baño de material abierto alrededor de los electrodos. Alternativamente, el horno eléctrico puede operar con una cobertura sólo parcial de la superficie del material fundido (parte superior caliente). Se utilizan electrodos de grafito y, en consecuencia, una pequeña cantidad de hierro metálico libre de las materias primas es reducida. El sangrado de hierro es necesario, pero con una frecuencia mucho menor (una vez a la semana o menos) que para los cubilotes.

2.10. Fibra Cerámica

[tm8 S2 3.03]

El proceso puede dividirse en dos partes, la producción de la fibra y la conversión de la fibra en otros componentes. Las composiciones químicas típicas de la fibra cerámica se indican en la Tabla 2.9.

Los óxidos de aluminio, calcio, magnesio, silicio y zirconio se suministran en camiones cisterna y son transferidos neumáticamente a silos de almacenamiento. Las materias primas de menor volumen, como los aditivos orgánicos, se reciben y dispensan en bidones o sacos. Las materias primas en gran volumen son transferidas desde el almacenaje a la planta de pesada y mezcla, en donde se mezclan para obtener la composición requerida. El material mezclado se transfiere al horno, donde se funde mediante calentamiento resistivo eléctrico a temperaturas de hasta 2000 °C. Los hornos tienen una profundidad de alrededor de 1 metro y un diámetro de 2-3 metros, y tienen la parte superior abierta, que se cubre con una capa de materias primas de mezcla sin fundir.

Una corriente de material fundido fluye desde el horno, cayendo sobre ruedas que giran a alta velocidad, que lanzan una lluvia de fibras sobre una cámara de recolección, o alternativamente, frente a un chorro de aire a alta presión que transforma el material fundido en fibras. En ningún caso se agregan aglomerantes a las fibras, pero puede agregarse una pequeña cantidad de lubricante, que facilita el enfurtido con agujas.

Si la producción de fibras se interrumpe, la corriente fundida no se para, se enfria en agua y si es practicable se reutiliza en el proceso.

Las fibras son extraídas de la cámara de recolección pasan a una correa de movimiento continuo a la que puede aplicarse vacío. A medida que la lana espesa sale de la correa de deposición, puede extraerse, embalarse y ensacarse, o dejarla continuar por la línea de producción para fabricar plancha. Este material puede embalarse como producto o enfurtirse con agujas, tejiendo las fibras juntas para mayor resistencia. El producto puede pasarse a través de un horno para eliminar el lubricante antes de ser enrollado como plancha o cortarse en piezas de tamaños predeterminados.

También puede realizarse un ulterior proceso de acabado. El proceso de moldeo al vacío consiste en colocar una muestra coloidal húmeda de almidón, látex, sílice o arcilla en moldes de forma apropiada. La forma moldeada se seca normalmente en un horno con combustión a gas, y puede ser pulida o troquelada y cortada al tamaño deseado antes de su embalaje y expedición. También puede producirse papeles, fieltros y cartones. Esto comporta la deposición de una suspensión acuosa de fibras en un bidón al vacío, seguida de un secado en horno. Puede agregarse una mezcla de aglomerantes y aditivos a la suspensión acuosa.

Componente	Silicato de alúmina de alta pureza (%)	Silicato de alúmina y zirconio (%)
SiO ₂	48,5 - 54	47,5 - 50
Al ₂ O ₃	45,5 - 50,5	35 - 36
K ₂ O	< 0,01	<0,01
Na ₂ O	0,2	<0,03
MgO	<0,01	0,01
CaO	<0,05	<0,05
TiO ₂	0,02	0,04
ZrO ₂	0,2	15 - 17
Fe ₂ O ₃	<0,2	<0,05
Cr ₂ O ₃	<0,01	<0,01

Tabla 2.9: Composición química de las fibras refractarias típicas en tanto por ciento en peso

2.11. Fritas

[tm8 S2 3.03, tm46 ANFFECC]

Las fritas se preparan fundiendo las materias primas en un horno de fusión a alta temperatura. El material fundido es luego enfriado bruscamente, lo que hace que el material fundido solidifique rápidamente.

mente y se fragmenta en partículas quebradizas denominadas fritas. La frita de vidrio se utiliza como materia prima en la producción de barniz cerámico. Se trata de un recubrimiento vítreo que se aplica a un cuerpo de cerámica y se funde mediante la aplicación de calor. De forma similar, la frita de esmalte es la materia prima utilizada en la producción de esmalte. Se aplica a los metales para fines de decoración y/o protección. Los barnices y esmaltes pueden aplicarse secos o húmedos, estos últimos predominan y son normalmente en forma de suspensión o lechada.

El proceso de fritado fusiona materias primas solubles en agua en un vidrio insoluble, lo que facilita mantener estas materias primas uniformemente distribuidas en la suspensión de barniz o esmalte durante el proceso subsiguiente. Además, algunas de las materias primas empleadas en la fabricación de barnices y esmaltes son a la vez tóxicas y solubles. La conversión de estas materias en un vidrio insoluble minimiza la disolución de sustancias tóxicas y por consiguiente su potencial de emisión a la atmósfera.

Las materias primas utilizadas en la fabricación de vidrio y de frita de esmalte son esencialmente las mismas. Pueden dividirse en cuatro grupos distintos, refractarios, fundentes, opacificadores y agentes colorantes. Los refractarios son materias como arcilla, feldespato y cuarzo. Generalmente tienen carácter ácido y proporcionan cuerpo a la frita. Los fundentes son de carácter básico y reaccionan con los refractarios ácidos para formar el vidrio. Son materias como carbonato sódico, potasa, bórax, criolita y espato flúor.

Los opacificadores proporcionan el aspecto opaco blanco característico de muchos barnices. Pueden ser insolubles, como el dióxido de titanio, el óxido de estaño y el óxido de zirconio, u opacificadores de desvitrificación como la criolita o el espato flúor. Estos últimos pueden también actuar como fundentes, lo que hace que los esmaltes sean más fundibles. Los opacificadores no siempre se incluyen en la etapa de fritado, sino que pueden añadirse luego durante la producción de la suspensión. Los agentes colorantes pueden ser óxidos, elementos o sales. Además de sus propiedades colorantes, pueden actuar como refractarios o fundentes, e incluyen materias primas como óxido de cobalto, óxido de cromo y óxido de manganeso.

Las materias primas pueden almacenarse en silos y transportarse a la zona de pesaje por medios neumáticos o mecánicos. No obstante, debido al tamaño relativamente pequeño de algunos fabricantes, muchas materias se almacenan en sacos y se dosifican manualmente al aparato de pesaje. Las distintas materias primas se pesan de forma precisa y se mezclan para producir una mezcla que es química y físicamente uniforme antes de su colocación en el horno.

La industria de fritas utiliza tanto hornos continuos como hornos discontinuos por cargas. La elección del horno depende de la escala de producción y de la formulación del producto. La naturaleza del negocio es tal que es frecuente la producción de lotes pequeños de una amplia gama de formulaciones de fritas. Los hornos de fritas son normalmente de combustión a gas o fuel-oil, y la mayoría de plantas de fritas modernas en Europa utilizan oxícombustión.

En los hornos continuos, las materias primas se cargan a través de un alimentador de husillo y forman un montón en el punto de mezcla. Quemadores situados a lo largo de los lados proporcionan condiciones de temperatura de estabilidad apropiada para permitir que la mezcla del montón se funda continuamente. Los hornos continuos de menor tamaño pueden ser de llama de bucle con un solo quemador. A medida que se funden las materias primas, forman una capa fina en la base del horno que fluye, saliendo por el lado opuesto. La producción se mantiene constante debido a la alimentación en continuo del montón de materias primas en la entrada. La frita fundida puede enfriarse directamente en un baño de agua o entre rodillos refrigerados por agua para producir un producto en escamas.

Los hornos en discontinuo por cargas son hornos con revestimiento refractario en forma de caja o cilindro, montados sobre cojinetes para permitir un grado de rotación. Para evitar la contaminación, estos hornos están normalmente dedicados a tipos de formulaciones similares, aunque es posible purgar los hornos entre fusiones. Las materias primas se cargan a través de una toma en la parte superior del horno, y

esto puede producir a corto plazo un alto nivel de emisión de partículas. El enfriamiento directo en agua se utiliza casi exclusivamente en la fabricación por cargas, y el agua de enfriamiento puede quedar contaminada con partículas y componentes solubles del material fundido.

Las temperaturas en el horno son normalmente del orden de 1000 °C a 1500 °C, aunque se utilizan temperaturas más bajas para fritas con alto contenido de plomo. Durante la operación de fusión pueden generarse vapores metálicos y otras partículas. El tiempo de estancia en el horno es normalmente inferior a 4 horas.

Para producir una suspensión, la frita debe primero molarizarse finamente. La molarización se realiza normalmente en molinos de bolas utilizando bolas de alúmina o granos de sílex. Otros componentes del barniz o esmalte, como arcillas, colores, electrolitos y opacificadores, pueden agregarse en cualquier etapa deseada del ciclo de molarización. Los tiempos de los ciclos de molarización pueden variar de 6 a 16 horas. Al finalizar la operación de molarización, la suspensión mezclada se pasa sobre un tamiz de malla y por un imán para eliminar el hierro atrapado. Para productos secos, la suspensión resultante puede secarse, o utilizar un proceso de molarización seco.

CAPÍTULO 3. NIVELES ACTUALES DE EMISIONES Y CONSUMOS

3.1. Introducción

Este capítulo proporciona información sobre los rangos de consumos y emisiones registrados en la Industria del Vidrio a lo largo del abanico de procesos y técnicas descritos en el Capítulo 2. Se discuten las entradas y salidas para la industria en su conjunto, y luego se hace una consideración más específica para cada sector.

Las características clave de las emisiones, las fuentes de emisiones y los aspectos energéticos se identifican en este capítulo y se discuten con más detalle para cada técnica en el Capítulo 4. La información de este capítulo tiene por finalidad permitir ver de forma contextual las cifras de emisiones y consumos de una determinada instalación que se esté considerando para un permiso, frente a otros procesos del mismo sector o a la Industria del Vidrio en su conjunto.

La mayoría de las materias primas de la Industria del Vidrio son minerales naturales o sustancias inorgánicas sintéticas. La mayoría de los minerales utilizados son abundantes en la naturaleza y en general no hay aspectos medioambientales importantes asociados con el aprovisionamiento de estos materiales. No obstante, una de las consideraciones de la Directiva IPPC es minimizar el consumo de materias primas de forma proporcionada con las MTD. Las materias primas sintéticas se fabrican por lo general en industrias sujetas a reglamentos separados. Los residuos de proceso y los residuos de consumo son cada vez más importantes como materias primas para la Industria del Vidrio, en particular en los Sectores de Vidrio para envases y Lana Mineral.

Las principales preocupaciones medioambientales para la Industria del Vidrio en su conjunto son las emisiones a la atmósfera y el consumo de energía. La fabricación de vidrio es un proceso a alta temperatura con un uso intensivo de la energía, y la energía se suministra directamente mediante la combustión de combustibles fósiles, mediante calentamiento eléctrico o mediante una combinación de ambas técnicas. En general, las emisiones más significativas son de óxidos de nitrógeno, partículas, dióxido de azufre, haluros y, en algunos casos, metales. La contaminación del agua no es un aspecto importante para la mayoría de instalaciones de la industria del vidrio, aunque evidentemente hay excepciones. El agua se utiliza principalmente para limpieza y refrigeración, y normalmente se trata o reutiliza *in situ*. Los niveles de agua de proceso son relativamente bajos, y la mayoría de corrientes de residuos sólidos se reciclan dentro del proceso.

La Industria del Vidrio es extremadamente diversa y el resumen anterior es claramente una generalización muy amplia. Existen excepciones para opciones de proceso específicas o para plantas individuales, y las prioridades medioambientales pueden variar de un sector a otro. Cuando estas excepciones son inherentes a un sector particular, se discuten en la sección correspondiente. No obstante, no es posible cubrir todas las eventualidades de todas las plantas, y en una instalación determinada puede haber algunas emisiones no consideradas en este documento. Por consiguiente, la información sobre las emisiones de proceso dada aquí no debe considerarse exhaustiva. La información presentada en esta sección hace referencia a toda la gama de tamaños de plantas y operaciones, pero no incluye los modos especiales como la puesta en marcha y la parada. Algunos de los valores de emisiones más bajos hacen referencia a la operación de una sola planta, que consigue estas cifras por motivos específicos de ese centro, y los resultados no son necesariamente indicativos de las MTD para el sector.

Las emisiones pueden variar notablemente entre sectores y entre las distintas instalaciones. Los principales factores son: diferencias inherentes en las materias primas y productos para cada sector, la selección del proceso (particularmente la opción del horno de fusión), la escala del proceso y el grado de eliminación aplicado. Cuando se consideran las emisiones de distintos sectores e instalaciones, es importante considerar, además de las concentraciones de las emisiones, la cantidad global de cualquier sustancia, así como la masa emitida por tonelada de producto de fusión.

Algunos de los datos de emisiones presentados en este capítulo son necesariamente bastante generales y pueden contener rangos bastante amplios. Estos rangos son representativos pero no necesariamente proporcionan suficiente detalle para comparar con una instalación particular en estudio. Por este motivo, en el Anexo I se presenta una serie de casos ampliamente representativos de los rangos dados o que representan ejemplos de comportamiento dentro de un determinado sector.

3.2. Visión General de la Industria del Vidrio

Esta sección ofrece una visión cualitativa de los aspectos que son comunes a la mayoría de procesos y sectores de la Industria del Vidrio. Los aspectos específicos relativos a cada sector se cubren en las secciones posteriores que, cuando es posible, presentan información cuantitativa sobre niveles de emisiones y consumos. En el Capítulo 4 se facilitan consideraciones más detalladas de los mecanismos de formación de las sustancias emitidas, así como de los factores que afectan los niveles de emisión, si procede.

3.2.1. Entradas al Proceso

Las principales entradas al proceso pueden dividirse en cuatro categorías principales: materias primas (que forman parte del producto), energía (combustibles y electricidad), agua, y materias primas auxiliares (ayudas de proceso, agentes de limpieza, agentes químicos de tratamiento de agua, etc.). Los temas energéticos se tratan por separado en la Sección 3.2.3.

La Industria del Vidrio, según se describe en el ámbito del documento, incluye muchos distintos procesos con una amplia gama de productos, materias primas y opciones de proceso. No es posible cubrir todas las entradas al proceso incluso dentro de las secciones específicas del sector. Por consiguiente, este documento se concentra en las entradas que son más comunes dentro de la industria y las que tienen el mayor efecto sobre el entorno.

Las materias primas de la Industria del Vidrio son principalmente compuestos inorgánicos sólidos, tanto minerales que se encuentran en la naturaleza como productos sintéticos. Varían desde materias primas muy gruesas a polvos finamente divididos. También se usan ampliamente líquidos y gases, como materias primas auxiliares y como combustibles.

La Tabla 3.1 lista las materias primas más comunes utilizadas para la producción de vidrio. Debido a la amplia gama de materias primas potenciales, esta tabla debe verse únicamente como indicativa, no como exhaustiva. Las materias primas utilizadas en el moldeo de productos y otras actividades de acabado (como recubrimientos y aglomerantes) son más específicas de cada sector y se discuten en secciones posteriores. Una materia prima de importancia creciente para la fusión es el polvo reciclado de los sistemas de aspiración del proceso. La composición del polvo dependerá de la naturaleza del proceso y de si se emplean absorbentes.

Materia Prima	Forma	Descripción	Fuente / Comentarios
Materias primas que componen el vidrio			
Arena de sílice	Granular	Principal fuente de SiO ₂	Se extrae como arena granular o como piedra arenisca, que posteriormente se Tritura, se clasifica y se trata para eliminar las impurezas. Se requiere una alta pureza.
Vidrio de desecho de proceso	Granular	Vidrio	Vidrio reciclado del proceso de fabricación. Composición del vidrio idéntica al vidrio producido.
Vidrio de desecho de consumo	Granular	Vidrio	Vidrio reciclado de los programas de recogida selectiva. La pureza y homogeneidad de color del vidrio pueden ser variables.
Materias primas intermedias y de modificación			
Sienita Nefelínica Na ₂ O.K ₂ O.Al ₂ O ₃ .SiO ₂	Granular	Fuente principal de óxido de aluminio en el vidrio transparente	Se extrae, Tritura y Clasifica. Bajo contenido de hierro. Hay dos fuentes importantes en el mundo, Noruega y China, también Canadá.
Carbonato sódico (Na ₂ CO ₃)	Granular	Fuente principal de Na ₂ O	Fabricado a partir de la sal natural usando el proceso Solvay en Europa, por lo que contiene algo de NaCl. También se importa carbonato sódico natural de EE.UU. Las fuentes africanas se utilizan raramente en Europa.
Piedra caliza (CaCO ₃)	Granular	Fuente principal de CaO	Mineral natural que se extrae, Tritura y Clasifica. En el sector de lana de roca, la piedra caliza se utiliza en grandes piezas, normalmente de > 50mm de diámetro.
Dolomita (CaCO ₃ .MgCO ₃)	Granular	Fuente de CaO y MgO	Mineral natural que se extrae, Tritura y Clasifica. En la lana de roca, la dolomita se utiliza en grandes piezas, normalmente de > 50mm de diámetro.
Carbonato potásico	Granular	Fuente de K ₂ O	Se utiliza en el vidrio especial (vidrio al plomo, vidrio para TV, etc.). Producto sintético.
Colemanita	Polvo	Fuente de boro	Borato natural de Turquía, se utiliza en filamentos de vidrio continuos.
Bórax	Granular	Fuente de boro	Borato sódico sintético, procede de California.
Ácido bórico H ₃ BO ₃	Granular	Fuente de boro	Producto sintético, utilizado normalmente en filamentos de vidrio continuos.
Feldespato	Granular	Fuente de Al ₂ O ₃	Principal fuente de alúmina en el vidrio sodocálcico coloreado. Producto natural.
Espato flúor CaF ₂	Granular	Fuente de flúor.	Producto natural utilizado principalmente en vidrio opalino.
Óxidos de plomo	Polvo	Fuente de PbO.	Aportan al vidrio al plomo y vidrio especial.
Carbonato bárico	Granular	Fuente de óxido de bario BaO	Producto sintético usado principalmente en vidrio especial.
Basalto	Granular	Alumino-silicato	En la lana de roca, se utiliza en grandes piezas, normalmente de > 50mm de diámetro.
Sulfato sódico anhidro	Granular	Agente afinante y oxidante, fuente de Na ₂ O	Producto sintético.
Sulfato cálcico y yeso	Granular	Agente afinante y oxidante, fuente secundaria de CaO	Material natural o producto sintético.
Arcilla de China	Polvo	Fuente de alúmina.	Producto natural utilizado principalmente en filamentos de vidrio continuos.
Nitrato sódico	Granular	Agente afinante y oxidante, fuente de Na ₂ O	Producto sintético.
Nitrato potásico	Granular	Agente afinante y oxidante, fuente de K	Producto sintético.
Oxido de	Polvo	Agente afinante y	Producto sintético, principalmente para

Materia Prima	Forma	Descripción	Fuente / Comentarios
antimonio		oxidante	formulaciones de vidrio especial.
Trióxido de arsénico	Polvo	Agente afinante y oxidante	Producto sintético, principalmente para formulaciones de vidrio especial y de vidrio al plomo.
Escoria Mezcla de Ca, Al, Mg, Fe silicato y sulfuro	Granular	Fuente de óxido de aluminio, óxidos modificantes, agentes de afino, agentes fundentes y colorantes.	Subproducto de los altos hornos. El tamaño de partícula debe ajustarse a las materias primas del vidrio.
Carbono	Granular o polvo	Agente reductor	Producto sintético o natural procesado, se utilizan pequeñas cantidades para producir un vidrio con un estado de oxidación reducido al fabricar vidrio verde, ámbar y en ocasiones transparente.
Cloruro sódico	Cristales	Agente de afino	Se utiliza en algunos vidrios de borosilicato.
Agentes colorantes			
Cromito férrico (Fe_2O_3, Cr_2O_3)	Polvo	Agente colorante	Se extrae, tritura y clasifica. El cromito férrico es el agente colorante utilizado para producir los vidrios para envases de color verde.
Oxido e hierro (Fe_2O_3)	Polvo	Agente colorante	Producto sintético utilizado principalmente como agente colorante en vidrios de color verde y ámbar.
Oxido de cobalto	Polvo	Agente colorante	Producto sintético utilizado como decolorante y como colorante para la producción de vidrio azul.
Selenio metal / zinc o selenita sódica	Polvo	Agente colorante	Producto sintético, también se utilizan trazas como "decolorante" (corrector de color). Se utilizan grandes cantidades para vidrio al bronce.

Tabla 3.1. Materias primas utilizadas en la Industria del Vidrio [tm18 CPIV]

La Industria del Vidrio en su conjunto no es un consumidor importante de agua, sus principales aplicaciones son refrigeración, limpieza y humidificación de las mezclas. Algunos sectores utilizan agua para otros fines, que se discuten con más detalles en las secciones de los sectores específicos. Cuando es factible, los circuitos de agua son circuitos cerrados que compensan las pérdidas por evaporación. El agua puede tomarse del suministro general o de fuentes naturales.

El término materias primas auxiliares se utiliza para describir las sustancias que se utilizan en la fabricación de los productos pero que no forman parte del producto final. Por ejemplo, el estaño y el hidrógeno utilizados en los baños de vidrio flotado, el oxígeno de los sistemas de oxicombustión, el dióxido de azufre en el vidrio plano (y ocasionalmente en el vidrio para envases), el tratamiento superficial, y los componentes de corte y ácidos de pulido utilizados en la producción de vidrio al plomo. Estos tipos de materias primas son generalmente bastante específicos de cada sector y se discuten en secciones posteriores. El impacto de estas materias primas en las emisiones del proceso varía de un caso a otro. En algunos casos puedes ser bastante significativas, como en el pulido con ácido, mientras que en otros son muy bajas, como las emisiones de estaño de los baños de flotación.

La fabricación de vidrio es un proceso con un uso intensivo de la energía y por consiguiente los combustibles pueden constituir un aporte considerable a los procesos. Las principales fuentes de energía dentro de la Industria del Vidrio son fuel-oil, gas natural y electricidad. Los aspectos energéticos y de combustibles se discuten en la Sección 3.2.3 y en las secciones de los sectores específicos.

3.2.2. Salidas de los Procesos

Las principales salidas de los procesos pueden dividirse en cinco categorías fundamentales: producto, emisiones a la atmósfera, caudales de residuos líquidos, residuos sólidos y energía. Los residuos líquidos y sólidos pueden reciclarse o desecharse, según los aspectos específicos del proceso. En general, las instalaciones de producción de vidrio no tienen volúmenes importantes de coproductos o subproductos. No obstante, cada vez es más frecuente que materiales que se desecharían como residuo sean convertidas en una forma vendible (o sin coste), para ser usada como material de alimentación para otros procesos o como producto final.

En general, la fabricación de vidrio comporta la fusión de una masa importante de materias primas, como óxidos de metales, carbonatos, sulfatos o nitratos. En la fusión, estas sustancias se descomponen y liberan gases como dióxido de carbono, vapor de agua, y óxidos de azufre y nitrógeno. Las materias primas de la mezcla pueden también contener humedad (entre un 0 y un 4%, físicamente o incorporada químicamente), y al calentarse el material se libera vapor de agua. En general, entre un 3 y un 20% del peso de la mezcla puede emitirse como gases. Cuando se utilizan grandes cantidades de vidrio de desecho, la cifra puede estar en el extremo inferior de este rango (1 tonelada de vidrio de desecho sustituye aproximadamente 1,2 toneladas de material virgen).

El proceso puede producir asimismo ruido y olores. El ruido proviene de una serie de actividades como ventiladores, motores, manipulación de materias primas, movimientos de vehículos, actividades técnicas y sistemas de aire comprimido. El ruido no se considera un problema particular en la Industria del Vidrio. No obstante, es evidente que hay fuentes de ruido que pueden suponer problemas si hay zonas residenciales próximas. En general, los problemas se resuelven fácilmente con un buen diseño y, si es necesario, técnicas de eliminación de ruido. Ciertas técnicas de control de contaminación requieren asimismo control de ruido, que puede suponer un coste adicional al de la técnica. Los olores no son generalmente un problema en la Industria del Vidrio, pero pueden derivarse de algunas actividades y pueden ser necesarias medidas para evitar problemas exteriores. Las principales actividades que pueden estar asociadas con problemas de olor son el polimerización de la lana mineral, el precalentamiento del vidrio de desecho y en ocasiones el almacenamiento de fuel-oil.

3.2.2.1. Emisiones a la Atmósfera

Materias Primas

Todos los sectores dentro de la Industria del Vidrio comportan el uso de materias primas en polvo, en forma granular o pulverulentas. El almacenamiento y manipulación de estas materias representa un potencial considerable de emisiones de polvo. El movimiento de materias a través de sistemas que incluyen silos y recipientes de mezcla produce el desplazamiento de aire, que si es incontrolado puede contener concentraciones de polvo muy elevadas. Esto es particularmente cierto si se emplean sistemas de transferencia neumática. La transferencia de materias primas utilizando sistemas de transporte y manipulación manual puede también producir emisiones de polvo significativas.

Muchos procesos en la Industria del Vidrio suponen el uso de vidrio de desecho (interno o externo), que puede requerir su clasificación y trituración antes de su uso en el horno. Al igual que todos los procesos similares, tiene un potencial de emisiones de polvo. El nivel de emisiones dependerá de factores como el diseño de la instalación, si la aspiración se filtra antes de su evacuación, de la hermeticidad de las naves, etc. Algunos procesos comportan también el uso de líquidos volátiles, que pueden producir emisiones a la atmósfera de pérdidas por respiración de los tanques y por el desplazamiento de vapor durante las transferencias de líquidos.

Fusión

Para muchos de los procesos que entran dentro del ámbito de este documento, el mayor potencial de contaminación medioambiental se deriva de las actividades de fusión. En general, los principales contaminantes medioambientales derivados de la fusión son:

- ✓ Los productos de la combustión de combustibles fósiles y la oxidación a alta temperatura del nitrógeno de la atmósfera de combustión (es decir, dióxido de azufre, dióxido de carbono y óxidos de nitrógeno);
- ✓ Las materias en forma de partículas, derivadas principalmente de la volatilización y condensación subsiguiente de los compuestos volátiles de la mezcla, y

- ✓ Los gases emitidos de las materias primas y del material fundido durante el proceso de fusión.

Cuando se utiliza calentamiento 100% eléctrico, las emisiones de productos de combustión y el NOx generado térmicamente se eliminan, y las emisiones de partículas se derivan principalmente de la transferencia de la mezcla. La sustitución parcial de la combustión con combustibles fósiles por calentamiento eléctrico reduce las emisiones directas de la instalación, según el nivel de sustitución y las condiciones de combustión particulares. La combustión con oxícombustión reduce enormemente el nivel de nitrógeno en el horno, lo que reduce el potencial de formación de NOx. Normalmente hay emisiones fuera del centro asociadas con la producción de electricidad y oxígeno, que deben ser tenidas en consideración a la hora de evaluar el impacto medioambiental global.

Los hornos utilizados en la Industria del Vidrio, y dentro de cada sector, varían considerablemente en tamaño, capacidad de producción, técnica de fusión, diseño, edad, materias primas empleadas, y técnicas de eliminación utilizadas. Por consiguiente, hay una variación considerable en las emisiones reportadas. También hay diferencias significativas en las metodologías empleadas para medir las emisiones, lo que puede hacer que las comparaciones directas de algunos datos reales puedan ser engañosas. Los valores mínimos no siempre son indicativos de la mejor tecnología y pueden sólo reflejar condiciones operativas más favorables (Ej. Producción estable de gran volumen, o composiciones de bajas emisiones) o plantas con una menor producción. Evidentemente, muchas de las emisiones más bajas representan las plantas modernas con medidas de eliminación avanzadas, o tecnologías “limpias”. Las principales emisiones derivadas de las actividades de fusión en la Industria del Vidrio se resumen en la Tabla 3.2 siguiente.

Emisión	Fuente / Comentarios
Partículas	Condensación de componentes volátiles de la mezcla. Arrastre de material fino en la mezcla. Producto de la combustión de algunos combustibles fósiles.
Oxidos de nitrógeno	NOx térmico debido a las elevadas temperaturas del horno de fusión. Descomposición de los compuestos de nitrógeno de la mezcla. Oxidación del nitrógeno contenido en los combustibles.
Oxidos de azufre	Azufre en el combustible. Descomposición de los compuestos de azufre de la mezcla Oxidación del sulfuro de hidrógeno en las operaciones con cubilotes.
Cloruros / HCl	Presentes como impurezas en algunas materias primas, particularmente carbonato sódico y vidrio de desecho externo. NaCl usado como materia prima en algunos vidrios especiales.
Fluoruros / HF	Presentes como impurezas menores en algunas materias primas, incluido el vidrio de desecho. Agregados como materia prima en la producción de frita de esmalte para conferir determinadas propiedades al producto acabado. Agregados como materia prima en la industria de la fibra de vidrio de filamentos continuos, o para producir ciertas propiedades en el vidrio, como la opalescencia. Cuando se agregan fluoruros a la mezcla, normalmente como espato flúor, las emisiones <u>incontroladas</u> pueden ser muy elevadas.
Metales pesados (Ej. V, Ni, Cr, Se, Pb, Co, Sb, As, Cd)	Presentes como impurezas menores en algunas materias primas, vidrio de desecho de consumo y combustibles. Utilizados en fundentes y agentes colorantes en la industria de fritas (predominantemente plomo y cadmio). Utilizados en algunas formulaciones de vidrio especial (Ej. vidrio al plomo y algunos vidrios coloreados). El selenio se utiliza como colorante (vidrios rosa, gris y bronce), o como agente decolorante en algunos vidrios transparentes.
Dióxido de carbono	Producto de combustión. Emitido tras la descomposición de carbonatos en las materias de la mezcla (Ej. carbonato sódico, piedra caliza).
Monóxido de carbono	Producto de combustión incompleta, particularmente en cubilote.
Sulfuro de hidrógeno	Formado a partir del azufre en las materias primas o el combustible en los cubilotes, debido a las condiciones reductoras encontradas en partes del cubilote.

Tabla 3.2: Resumen de emisiones a la atmósfera derivadas de las actividades de fusión

Las concentraciones de las emisiones de metales pesados y elementos de trazas pueden ser muy significativas en algunos procesos, y están presentes generalmente en el polvo. La Tabla 3.3 siguiente ha sido tomada de [tm41 VDI2578] y muestra algunos ejemplos reales. Las cifras pueden normalmente tomarse como cifras máximas ilustrativas y no son indicativas del uso de las MTD.

Metal	Vidrio para envases	Vidrio Plano	Vidrio al plomo
Vanadio (al quemar fuel-oil)	hasta 4 mg/Nm ³	hasta 2 mg/Nm ³	
Níquel (al quemar fuel-oil)	hasta 0,5 mg/Nm ³	hasta 0,4 mg/Nm ³	
Cromo (vidrio verde)	hasta 3 mg/Nm ³		
Selenio	hasta 1 mg/Nm ³		
Selenio, gaseoso (cristal hueco de sílex)	hasta 14 mg/Nm ³		
Plomo	hasta 4 mg/Nm ³	hasta 1 mg/Nm ³	hasta 700 mg/Nm ³
Cadmio	hasta 0,3 mg/Nm ³	hasta 0,1 mg/Nm ³	
Antimonio			hasta 10 mg/Nm ³
Arsénico			hasta 20 mg/Nm ³

Tabla 3.3: Posibles emisiones de metales pesados de los procesos del vidrio

[tm41 VDI2578]

Actividades de Acabado

Este término se emplea para describir actividades realizadas tras la fusión, como moldeo, recocido, aplicación de capas, proceso, etc. Las emisiones de las actividades de acabado pueden variar enormemente entre los distintos sectores y se discuten en las secciones de los sectores específicos. Aunque muchos de los sectores comparten algunas técnicas de fusión similares, las actividades de acabado tienden a ser exclusivas de cada sector. En general, puede haber emisiones a la atmósfera de:

- Aplicación o secado de recubrimientos (Ej. lana mineral, fibra de vidrio de filamentos continuos, vidrio para envases y algún vidrio plano):
- De todas las actividades realizadas sobre los materiales producidos como corte, pulido o proceso secundario (Ej. lana mineral, vidrio doméstico, vidrio especial, fibra cerámica); y
- De algunas operaciones de moldeo de productos (Ej. lana mineral y fibra cerámica).

3.2.2.2. Emisiones al Agua

En general, las emisiones al entorno acuático son relativamente bajas y hay pocos aspectos importantes que sean específicos de la Industria del Vidrio. En general, el agua se utiliza principalmente para limpieza y refrigeración y puede ser fácilmente reciclada o tratada mediante técnicas estándar.

La mayoría de actividades utilizan algunos líquidos, aunque sólo sean agentes químicos para el tratamiento del agua y lubricantes o fuel-oil. Todas las materias primas líquidas suponen una amenaza potencial para el entorno por su posible vertido como por un posible fallo en la contención. En muchos casos, un buen diseño básico y una buena práctica son suficientes para controlar las emisiones potenciales. Los aspectos específicos relativos a las emisiones acuosas se discuten en las secciones de los sectores específicos.

3.2.2.3. Emisiones de Otros Residuos

Una característica de la Industria del Vidrio es que la mayor parte del residuo de vidrio generado internamente se recicla de nuevo al horno. Las principales excepciones a esto son el sector de Fibra de Vidrio de Filamentos Continuos, el sector de Fibra Cerámica y los productores de productos muy sensibles a la calidad en los sectores de Vidrio Especial y Vidrio Doméstico. Los sectores de Lana Mineral y de Fritas muestran una amplia variación en la cantidad de residuos reciclados al horno, que van desde nada a casi un 100% para algunas plantas de lana de vidrio. Otros residuos producidos son los de la preparación

y manipulación de materias primas, los depósitos de residuos (generalmente sulfatos) en las corrientes de gases residuales, y materiales refractarios de desecho al término de la vida del horno.

En algunos sectores de la Industria del Vidrio se utilizan refractarios que contienen cromo para la construcción de paredes superiores, bóvedas y regeneradores. El cromo, combinado con magnesia para formar ladrillos de magnesio-cromo, es muy resistente al arrastre por parte de la mezcla y a los productos de combustión a las elevadas temperaturas que existen en las cámaras de los hornos de regeneración. El cromo usado en la preparación de estos materiales, Cr³⁺, es esencialmente inocuo, tiene una baja solubilidad y presenta un bajo riesgo. No obstante, a temperaturas elevadas en condiciones alcalinas y oxidantes, pequeñas cantidades del cromo se convierten a Cr⁶⁺ durante la campaña de uso del horno. Los compuestos de Cr⁶⁺ son muy solubles, tóxicos y carcinogénicos.

Al igual que con todos los residuos del horno, al final de la campaña se hace el máximo esfuerzo para reciclar los residuos. Cuando esto no sea posible, se determinará el contenido de Cr⁶⁺ de los refractarios de magnesio-cromo usados, con el fin de asegurar que sean correctamente clasificados y desecharlos apropiadamente. La industria está reduciendo gradualmente la cantidad de refractarios que contienen cromo mediante desarrollo y rediseño de los revestimientos.

También pueden usarse pequeños tonelajes de refractarios de óxido de cromo de gran pureza. Generalmente se adquieren sobre la base de que al final de la campaña serán retirados por el fabricante para su reciclaje. En algunos hornos de filamentos de vidrio continuos se utilizan grandes cantidades de este material.

3.2.3. Energía

[tm14 ETSU, tm18CPIV]

La fabricación de vidrio es un proceso con un uso intensivo de la energía, por lo que las selecciones de la fuente de energía, la técnica de calentamiento y el método de recuperación de calor son esenciales en el diseño de un horno. Las mismas selecciones son también algunos de los factores más importantes que afectan el comportamiento medioambiental y la eficacia energética de la operación de fusión. Así, uno de los aportes más importantes al proceso de fabricación de vidrio es la energía, y las tres principales fuentes de energía son fuel-oil, gas natural y electricidad. La excepción la constituye la fabricación de lana de roca, donde la técnica de fusión predominante es el cubilote, que se alimenta con coque.

En décadas recientes, el combustible predominante para la fabricación de vidrio ha sido el fuel-oil, aunque el uso de gas natural está creciendo. Hay varias calidades de fuel-oil, desde pesado a ligero, con distintos grados de pureza y de contenido de azufre. Muchos hornos grandes están equipados para funcionar a gas natural y a fuel-oil, y es frecuente que hornos con combustión predominantemente a gas quemen fuel-oil en uno o dos quemadores. La tercera fuente de energía común para la fabricación de vidrio es la electricidad, que puede usarse como la única fuente de energía o en combinación con combustibles fósiles. El calentamiento eléctrico resistivo es la única técnica que ha encontrado una amplia aplicación comercial dentro de la Industria del Vidrio. El calentamiento eléctrico indirecto sólo se ha utilizado para cubas y hornos de crisoles muy pequeños, o para calentar parte de una cuba (Ej. la cámara de trabajado o antecuerpo).

En general, la energía necesaria para fundir el vidrio representa más del 75% de los requisitos totales de energía de la fabricación de vidrio. Otras áreas significativas de consumo energético son los antecuerpos, el proceso de moldeo, el recocido, la calefacción de la fábrica y los servicios generales. El uso típico de energía para el Sector de Vidrio para envases, que representa alrededor del 60% de la producción de la UE es: horno 79%, antecuerpo 6%, aire comprimido 4%, túnel de recocido 2%, y otros 6%. A lo largo de este documento, las cifras de energía hacen referencia a la energía en el punto de uso, y no están corregidas a energía primaria.

Aunque hay amplias diferencias entre sectores y plantas individuales, el ejemplo del vidrio para envases puede considerarse como indicativo en líneas generales para toda la industria. La principal excepción a esta generalización es el Sector de Lana Mineral, en el que la operación de fibrado y el horno de polimerización son también importantes consumidores de energía.

Como se ha discutido anteriormente, fuel-oil y gas natural son las fuentes de energía predominantes, con un pequeño porcentaje de electricidad. Los antecuerpos y túneles de recocido son calentados con gas o electricidad, y la energía eléctrica se utiliza para accionar los compresores y ventiladores necesarios para el proceso. Los servicios generales incluyen el bombeo de agua, la producción de vapor para almacenaje de combustible y calentamiento auxiliar, humidificación / calentamiento de la mezcla, y calefacción de las naves. Algunos hornos están equipados con calderas de recuperación para producir parte o la totalidad del vapor necesario.

Con el fin de disponer de una referencia de la eficacia energética de un proceso, es útil considerar los requisitos energéticos teóricos para la fusión de vidrio. En la Tabla 3.4 se indican los requisitos energéticos teóricos para los tres vidrios más comunes. El cálculo supone que todo el calor disponible se utiliza plenamente y tiene tres componentes:

- ✓ El calor de reacción para formar el vidrio a partir de las materias primas;
- ✓ El calor necesario, o entalpía, para elevar la temperatura del vidrio desde 20 °C a 1500 °C;
- ✓ El contenido calórico de los gases (principalmente CO₂) liberados desde la mezcla durante la fusión.

	Sodocálcico (Vidrio plano/ Envases) GJ/tonelada	Borosilicato (8 % B ₂ O ₃) GJ/tonelada	Vidrio al plomo (19 % PbO) GJ/tonelada
Calor de reacción	0,49	0,41	0,40
Entalpía del vidrio	1,89	1,70	1,69
Entalpía de los gases emitidos	0,30	0,14	0,16
Requisitos energéticos teóricos	2,68	2,25	2,25

Tabla 3.4: Requisitos energéticos teóricos para la fusión de formulaciones comunes de vidrio

[tm14 ETSU]

Los requisitos energéticos reales observados en los distintos sectores muestran una amplia variación, situándose entre 3,5 y 40 GJ/tonelada. Esta cifra depende muy fuertemente del diseño del horno, de la escala y del método de operación. No obstante, la mayor parte del vidrio se produce en vidrios grandes, y los requisitos energéticos para la fusión están generalmente por debajo de 8 GJ/tonelada. El consumo energético se discute con más detalle para cada sector cuando hay información disponible.

Dado que la fabricación de vidrio es un proceso a alta temperatura con un uso intensivo de energía, es evidente que existe un elevado potencial de pérdida de calor. En años recientes se han realizado progresos sustanciales en la eficacia energética, y algunos procesos (Ej. hornos regenerativos grandes) se acercan al consumo energético mínimo teórico para la fusión, teniendo en cuenta las limitaciones inherentes de los procesos.

Un horno regenerativo moderno presenta una eficacia térmica global de alrededor de un 50% (máximo 60%), con pérdidas de gases de alrededor del 20%, y el resto está compuesto principalmente por pérdidas estructurales. Esta eficacia se compara bastante bien con otras actividades de combustión a gran escala, particularmente la producción de energía, que normalmente tiene una eficacia de alrededor del 30%. Las pérdidas estructurales son inversamente proporcionales al tamaño del horno, siendo el motivo principal el cambio en la relación entre superficie y volumen. Los hornos eléctricos y de oxícombustión tienen por lo general mejores eficacias energéticas que los hornos de combustibles fósiles, pero llevan asociadas desventajas que se discuten más adelante en este documento.

A continuación se detallan algunos de los factores generales que afectan el consumo energético de los hornos de combustibles fósiles. Para una determinada instalación, es importante tener en cuenta los aspectos específicos del centro que afectan la aplicabilidad de los comentarios generales que se indican a continuación. Estos factores afectan también las emisiones por tonelada de vidrio de las sustancias directamente relacionadas con la cantidad de combustible fósil quemado, en particular CO₂, SO₂ y NOx.

- a) La capacidad del horno afecta significativamente el consumo de energía por tonelada de vidrio fundido, ya que los hornos más grandes son inherentemente más eficaces energéticamente debido a su menor relación superficie-volumen.
- b) La productividad del horno es también importante, y la mayoría de hornos consiguen una producción más eficaz desde el punto de vista energético a su máxima carga. Las variaciones en la carga del horno dependen en gran medida del mercado y pueden ser bastante amplias, particularmente para algunos vidrios para envases y productos de vidrio doméstico.
- c) A medida que aumenta la edad del horno, su eficacia térmica suele disminuir. Hacia el final de la vida del horno, el consumo de energía por tonelada de vidrio fundido puede ser un 20% mayor que al inicio de la campaña.
- d) El uso de refuerzo eléctrico mejora la eficacia térmica del horno. No obstante, si se tienen en cuenta el coste de la electricidad, y la eficacia de la producción y distribución de energía, la mejora global es menor (o incluso negativa). El refuerzo eléctrico se utiliza generalmente para mejorar la capacidad de fusión del horno y no para mejorar la eficacia energética.
- e) El uso de vidrio de desecho puede reducir significativamente el consumo de energía, ya que la energía química necesaria para fundir las materias primas ya ha sido suministrada. Por regla general, un aumento del 10% en el uso de vidrio recuperado produce un ahorro de energía de un 2 – 3 % en el proceso de fusión.
- f) La oxicombustión puede también reducir el consumo de energía, particularmente en hornos más pequeños. La eliminación de la mayoría del nitrógeno de la atmósfera de combustión reduce el volumen de los gases residuales que salen del horno en un 60 – 80%. Por consiguiente, es posible un ahorro de energía, ya que no es necesario calentar el nitrógeno atmosférico a la temperatura de las llamas.

La eficacia energética es un aspecto muy complejo que se vuelve a tratar en las secciones de los sectores específicos de este capítulo, así como en el Capítulo 4. Desde los años 60, la Industria del Vidrio en su conjunto ha reducido el consumo específico de energía en aproximadamente un 1,5% anual. Hoy esta cifra es más baja, a medida que se alcanzan los límites termodinámicos.

La Tabla 3.5 ha sido tomada de la guía VDI alemana [tm41 VDI2578] y ofrece un resumen útil del consumo específicos de energía para una serie de modernos hornos de vidrio, eficaces desde el punto de vista energético.

Tipo de horno de cuba	Tipo de vidrio	Superficie de fusión *) m ²	Profundidad del baño de vidrio en el lado de fusión mm	Capacidad de la cuba en el lado de fusión t métricas	Relación longitud/anchura de la cuba de baño 1,9 – 3,0 : 1	Producción t métricas /d	Producción específica t métricas /m ² d	Consumo específico de energía **) kJ/kg vidrio
Horno de llama transversal con precalentamiento de aire regenerativo	Vidrio para envases o vidrio soluble	15 – 155	1.200 – 1.700	50 – 500	1,9 – 3,0 : 1	40 – 500	2,5 – 4,0	4.200
Horno regenerativo de llama de bucle	Envases	15 – 140	1.200 – 1.700	50 – 500	1,9 – 2,5 : 1	40 – 450	2,5 – 4,0	3.800
Horno de recuperación	Envases	hasta 250	1.100 – 1.600	50 – 650	2,0 – 2,8 : 1	40 – 450	2,0 – 3,0	5.000
Horno de oxicombustión ***)	Envases	110 – 154	1.300 – 1.700	390 – 600	2,0 – 2,4 : 1	350 – 425	2,3 – 3,5	3.050 – 3.500
Horno de llama transversal con precalentamiento de aire regenerativo	Vidrio plano	100 – 400	1.200 – 1.400	300 – 2.500	2,1 – 2,8 : 1	150 – 900	2,3 – 2,7	6.300
Horno de llama transversal con precalentamiento de aire regenerativo	Vidrio para tubos de TV (pantalla)	70 – 300	900 – 1.100	160 – 700	2,0 – 3,0 : 1	100 – 500	1,1 – 1,8	8.300
Horno precalentamiento de aire recuperativo	Vajillas	15 – 60	1.100 – 1.300	40 – 180	1,8 – 2,2 : 1	15 – 120	1,0 – 2,0	6.700
Horno precalentamiento de aire recuperativo	Fibra de vidrio	15 – 110	800 – 1.500	50 – 200	2,8 : 1	30 – 350	3,4	4.300

Tabla 3.5: Ejemplos de consumo específico de energía para una serie de hornos de vidrio [tm41 VDI2578]

*) La superficie del horno de vidrio para la fusión y el afinado de vidrio: normalmente es la superficie entre el alojamiento del sistema de control y la garganta; en el caso de los hornos de vidrio flotado, sin contar el área de acondicionamiento sin calefacción.

**) Consumo específico de energía sin contar el extremo de trabajo y el alimentador durante la puesta en marcha y funcionamiento con carga nominal (envejecimiento de la cuba 0,1 a 0,2% mensual; sin refuerzo eléctrico, precalentamiento del material fundido y utilización secundaria del calor residual) normalizado

70 % vidrio recuperado para vidrio para envases

20 % vidrio recuperado para vidrio flotado

40 % vidrio recuperado para vidrio de tubos de TV y vajillas

Ahorro energético por porcentaje de vidrio recuperado adicional usado: 0,15 a 0,3 %

Las cifras de consumo específico de energía que se dan son valores de referencia aproximados para plantas medias de tamaño medio y grande. No son adecuadas para consideraciones de balances energéticos debido a las grandes diferencias que se producen en casos individuales. El consumo específico de energía efectivo depende no sólo del contenido de vidrio recuperado y de la edad de la cuba, sino también, entre otros, de la composición de la mezcla, del precalentamiento del aire, de la carga específica de la cuba, del aislamiento de la cuba y del estándar de calidad requerido para el vidrio.

***) Los datos indicados están basados en la experiencia en dos plantas comerciales con tecnología de oxi-combustión. La energía requerida para la producción del oxígeno no está incluida en el consumo específico de energía.

3.3. Vidrio para envases

[tm18 CPIV]

Como se ha descrito en el Capítulo 1, el sector de Vidrio para envases es el mayor sector de la Industria del Vidrio de la UE, y representa alrededor del 60% de la producción total. En 1997 había 295 hornos en funcionamiento en 140 instalaciones. Los hornos son del tipo regenerativo de llama transversal, de recuperación, eléctricos, y con combustión de oxi-gas; y sus tamaños varían ampliamente desde menos de 50.000 toneladas anuales (10.000 para producción de botellas de perfume) a más de 150.000 toneladas anuales. La producción de una instalación con varios hornos puede ser de más de 1.000 toneladas diarias.

Evidentemente, un sector tan amplio y variado tiene variaciones significativas en la cantidad y tipos de entradas y salidas de proceso. No obstante, los productos de este sector se producen casi exclusivamente con formulaciones sodocálcico o modificaciones de las mismas, por lo que la variación en las materias primas de fabricación de vidrio es limitada.

La relación entre entrada de materia prima y material fundido producido varía según el nivel de vidrio de desecho utilizado, que afecta la cantidad de gases perdidos en la fusión. El desgasado y secado de las materias primas puede representar entre un 3% y un 20% de la entrada, y 1 tonelada de vidrio recuperado sustituye aproximadamente 1,2 toneladas de materias primas vírgenes. La relación entre “embalado y fundido” puede ir del 50% a más del 90%, y la mayoría del vidrio de desecho se recicla al horno.

La Tabla 3.6 siguiente ofrece un resumen de las principales entradas y salidas del proceso. Las emisiones corresponden a hornos típicos de rango medio.

	Unidades / tonelada (vidrio fundido)	Rango (valor medio)		
Entradas				
Vidrio recuperado de consumo	tonelada	0	-	0,85 (0,40)
Arena de sílice	tonelada	0,04	-	0,66 (0,35)
Carbonatos	tonelada	0,02	-	0,40 (0,20)
Ingredientes minerales menores	tonelada	0,002	-	0,05 (0,02)
Materiales refractarios del horno	tonelada	0,005	-	0,01 (0,008)
Materiales de embalaje	tonelada	0,040	-	0,080 (0,045)
Moldes y otros	tonelada	0,004	-	0,007 (0,005)
Energía, total fuel-oil / gas (1)	GJ	4	-	14 (6,5)
Energía, total electricidad (1)	GJ	0,6	-	1,5 (0,8)
Agua	m ³	0,3	-	10 (1,8)
Salidas				
Productos acabados y embalados	tonelada	0,75	-	0,97 (0,91)
Emisiones a la atmósfera				
- CO ₂	kg	300	-	1000 (430)
- NOx	kg	1,2	-	3,9 (2,4)
- SOx	kg	0,5	-	7,1 (2,5)
- polvo (sin eliminación secundaria)	kg	0,2	-	0,6 (0,4)
- polvo (con eliminación secundaria)	kg	0,002	-	0,05 (0,024)
- HCl (sin eliminación secundaria)	kg	0,02	-	0,08 (0,041)
- HCl (con eliminación secundaria)	kg	0,01	-	0,06 (0,028)
- HF (sin eliminación secundaria)	kg	0,001	-	0,022 (0,008)
- HF (con eliminación secundaria)	kg	0,001	-	0,0011 (0,003)
- metales (sin eliminación secundaria)	kg	0,001	-	0,011 (0,006)
- metales (con eliminación secundaria)	kg	0,000	-	0,002 (0,001)
- H ₂ O (evaporación y combustión)	tonelada	0,3	-	10 (1,8)
Agua residual	m ³	0,2	-	9,9 (1,6)
Residuos a reciclaje	tonelada	0,002	-	0,006 (0,005)
Otros residuos	tonelada	0,003	-	0,015 (0,005)

Tabla 3.6: Resumen de las Entradas y Salidas del Sector de Vidrio para Envases [tm18 CPIV] (1)
Energía total (hornos + otras) par una planta típica con hornos de combustibles fósiles.

3.3.1. Entradas al Proceso

Materias primas de formación de vidrio	Arena de sílice, vidrio de desecho, vidrio recuperado post consumo.
Materias primas fundentes, estabilizantes y afinantes	Carbonato sódico, piedra caliza, dolomita, sulfato sódico, escoria de alto horno, feldespato, sienita nefelínica, carbonato potásico, carbono, polvo de filtro.
Agentes colorantes y decolorantes del vidrio	Cromito férreo, óxido de hierro, sulfuro de hierro, óxido de cobalto, óxido de cerio, selenita con selenio o zinc.
Agentes de recubrimiento de producto (recubrimiento en caliente)	Cloruros metálicos inorgánicos u orgánicos. Predominantemente tetracloruro de estaño, tetracloruro de titanio y cloruro de monobutilestaño.
Lubricantes de producto	Lubricantes a base de polietileno y ácidos grasos (Ej. ácido oleico).
Combustibles	Fuel-oil, gas natural, electricidad, butano, propano.
Agua	Suministro de agua corriente y fuentes naturales locales (pozos, ríos, lagos, etc.).
Materias primas auxiliares	Materiales de embalaje como plásticos, papel, cartón y madera. Lubricantes de moldes, generalmente agentes de despegue a alta temperatura a base de grafito. Lubricantes para maquinaria, predominantemente aceites minerales. Gases de proceso, oxígeno y dióxido de azufre. Productos químicos para el tratamiento del agua de refrigeración y del agua residual.

Tabla 3.7: Materias primas utilizadas en el Sector de Vidrio para envases (CPIV Jan98)

Los principales aportes al proceso son las materias primas que contienen sílice (arena y vidrio recuperado) y los carbonatos (carbonato sódico, dolomita y piedra caliza). Las materias primas para la mezcla de vidrio se mezclan en la proporción correcta para producir la gama de composiciones de vidrio detalladas en el Capítulo 2. En la mayoría de composiciones de vidrio para envases, los óxidos de silicio, sodio y cal-

cio representan más del 90% del vidrio (SiO_2 71 - 73 %, Na_2O 12 - 14 % y CaO 10 - 12 %). El dióxido de silicio procede principalmente de las arenas y del vidrio recuperado, el óxido de sodio del carbonato sódico y el óxido de calcio principalmente de la piedra caliza y en menor grado de la dolomita.

Muchos procesos de vidrio para envases utilizan una cantidad considerable de casco de vidrio en las materias primas de la mezcla, situándose la media del sector en un 48%, compuesto por vidrio de desecho interno y vidrio recuperado de consumo. El uso de vidrio recuperado de consumo varía enormemente (desde 0 a >80%), pero casi todos los procesos reciclan su vidrio de desecho interno, que normalmente constituye un 10% de la mezcla. Los aportes de las otras materias primas de formación de vidrio, particularmente arena, carbonato sódico, piedra caliza y dolomita, varían según la cantidad de casco empleado y de su composición.

El uso de sustancias de tratamiento superficial del producto, como recubrimientos y tratamientos lubricantes, varía de un proceso a otro. No obstante, las cantidades de material utilizadas son muy bajas en relación con las materias primas de formación de vidrio. Como media, una línea de producción simple utiliza de 2 a 10 kg/día de agentes de recubrimiento y un nivel similar de tratamientos lubricantes.

Los combustibles empleados varían de un proceso a otro, pero en general para la fusión se utilizan fuel-oil, gas natural o electricidad, por separado o en combinación. Los antecuerpos y túneles de recocido se calientan con gas o electricidad, que también se utilizan para calefacción y servicios generales. El fuel-oil ligero, propano y butano se utilizan en ocasiones como combustibles de refuerzo.

Los principales usos del agua en el Sector de Vidrio para envases son para los circuitos de refrigeración y para limpieza. El agua se utiliza frecuentemente (generalmente en forma de vapor) para humedecer las materias primas de la mezcla (0 a 4% de humedad), con el fin de evitar la separación de las materias primas y reducir el arrastre de polvo del horno. El agua de refrigeración se emplea, normalmente en circuitos cerrados o abiertos, para refrigerar diversos equipos y enfriar el vidrio caliente de los rechazos de producción, con las correspondientes pérdidas por evaporación y purgas. El consumo real de agua y las emisiones de vapor de agua pueden variar de acuerdo con las condiciones locales (Ej. la temperatura ambiente y la dureza del agua utilizada).

3.3.2. Emisiones a la Atmósfera

3.3.2.1. Materias Primas

En la mayoría de procesos modernos de vidrio para envases, los silos y recipientes de mezcla están equipados con sistemas de filtros que reducen las emisiones a menos de 5 mg/Nm³. Las masas emitida por los sistemas con filtros y sin filtros dependen del número de transferencias, del tamaño de los gránulos, y de la cantidad de materia manipulada.

3.3.2.2. Fusión

En el Sector de Vidrio para envases, el mayor potencial de emisiones al medio ambiente lo suponen las emisiones a la atmósfera de las actividades de fusión. Las sustancias emitidas y las fuentes asociadas se indican en la Sección 3.2.2.1. La mayoría de hornos de este sector son calentados predominantemente con combustibles fósiles, tanto gas natural como fuel-oil. No obstante, debido al gran tamaño y la amplia distribución del sector, existe un rango particularmente grande de hornos en funcionamiento, lo que da origen a una muy amplia gama de niveles de emisiones. En las tablas siguientes, los niveles de emisiones se dividen en dos grupos: con y sin medidas secundarias. En el extremo inferior del rango de las instalaciones sin medidas secundarias, algunas de las técnicas primarias son bastante avanzadas, y análogamente, en el extremo superior del rango es poco probable que se hayan tomado medidas específicas de reducción de emisiones.

Los niveles de emisiones reportados se indican en la Tabla 3.8. La fuente de esta tabla es un estudio estadístico realizado entre miembros de la asociación comercial de vidrio para envases FEVE con los datos de 228 hornos con combustibles fósiles, con y sin refuerzo eléctrico, en todo el espectro de hornos y tipos de productos. Los datos hacen referencia a mediciones realizadas en 1996 y 1997. Las técnicas de muestreo y medición no están normalizadas, por lo que los datos sólo pueden considerarse como indicativos del rango de emisiones reales en el momento del estudio. Los datos de las emisiones de metales sólo se facilitaron para un 42% de los hornos, y los metales incluidos pueden variar.

Alrededor del 30% (72/228) de los hornos de vidrio para envases del estudio de la FEVE están equipados con eliminación secundaria. La eliminación secundaria a la que se hace referencia en todos los casos es la eliminación de polvo mediante un PE o menos frecuentemente, un filtro de mangas, generalmente con desulfuración anterior. El polvo de filtro se recicla en todos los casos, dentro de los límites impuestos por la posible sustitución de materias primas. La reducción global de las emisiones de óxidos de azufre corresponde pues en la práctica actual a la sustitución del sulfato en las materias primas. La desulfuración se considera como eliminación secundaria para otros gases ácidos (HCl y HF) con limitaciones similares sobre el efecto global debido al reciclaje del polvo de filtro. La eliminación secundaria de NOx (mediante SRC) sólo se halla instalada en una planta de envases de la UE (4 hornos), pero se cree que al menos un horno dispone de una licencia 3R.

Pueden observarse valores bajos de NOx (<600 mg/Nm³ o <1 kg/t) en ciertos hornos sin eliminación secundaria. Los factores que permiten estos valores bajos se describen en la Sección 4.4.2, con indicación de la aplicabilidad a las instalaciones existentes. Los valores elevados (>2000 mg/Nm³) sólo deben observarse en casos especiales, por ejemplo cuando se requiere el uso de nitratos como agente afinante / oxidante, o para ciertas configuraciones de hornos existentes en las que es difícil evitar temperaturas de llama localmente elevadas o fuga incontrolada de aire a las llamas.

Para SOx, los valores bajos (<300 mg/Nm³) representan situaciones con un bajo aporte de azufre del combustible, bajo nivel de sulfatos en la mezcla y sin exceso de SOx del vidrio recuperado. Los valores elevados son debidos exclusivamente al uso de combustibles con alto contenido de azufre, cuyo uso está en declive progresivo en la UE.

Pueden observarse valores bajos de polvo (<100 mg/Nm³) sin eliminación secundaria en circunstancias particulares, pero valores tan bajos son infrecuentes en el momento presente. Los valores muy elevados (>400 mg/Nm³) se observan por ejemplo en las emisiones sin sistemas de eliminación de hornos de vidrio de borosilicato. Las mediciones de las emisiones de polvo están particularmente sujetas a errores tanto por las técnicas empleadas como debido a la naturaleza compleja del equilibrio entre los distintos compuestos de azufre. Algunos valores reportados elevados o bajos de la concentración de polvo pueden estar pues sujetos a error de medición.

Pueden observarse valores bajos de HCl (<10 mg/Nm³) sin eliminación secundaria cuando se emplea carbonato sódico con bajo contenido en cloro (de yacimientos naturales) y altos niveles de vidrio recuperado. Nótese que en el caso de altos índices de reciclaje local asociados con el reciclaje de polvo de filtro, se acumula progresivamente cloro en el gas residual bruto, particularmente cuando el cloruro del tratamiento superficial del “lado caliente” se elimina en el mismo sistema. En este caso, la eliminación secundaria (en combinación con una desulfuración) no estará necesariamente asociada con los valores más bajos de emisiones, particularmente dado que las condiciones utilizadas para la desulfuración pueden no ser óptimas para la descloración con el mismo agente absorbente. Los valores elevados (>50 mg/Nm³) serán generalmente debidos al elevado contenido de cloro del carbonato sódico sintético.

El flúor es una impureza ocasional en algunas materias primas naturales. Puede estar presente como impureza en el vidrio reciclado (Ej. del vidrio opalino, que contiene flúor y que, aunque está excluido de las especificaciones del casco de vidrio, puede estar presente en pequeñas cantidades). No pueden hacerse generalizaciones sobre los valores bajos (sin eliminación secundaria) o los valores altos, que corresponden a casos particularmente favorables o desfavorables.

Pueden observarse valores bajos de metales ($<1 \text{ mg/Nm}^3$) en los gases residuales sin sistema de eliminación en casos favorables, particularmente con bajos niveles de vidrio recuperado (para impurezas de plomo), combustible bajo en vanadio o combustión a gas, y en ausencia de selenio en las materias primas (lo que es el caso para todos los vidrios excepto el vidrio al sílex blanco). Los valores elevados ($>5 \text{ mg/Nm}^3$) están generalmente asociados con porcentajes elevados de casco de vidrio (plomo), combustión a fuel-oil o producción de vidrio al sílex blanco (selenio).

Los datos de la Tabla 3.9 son del mismo estudio de la FEVE que los de la Tabla 3.8, y están divididos en poblaciones con o sin eliminación secundaria (72/228 y 156/228 hornos respectivamente para el caso principal de eliminación de polvo). El rango medio del 80% (P10 a P90) es una indicación del comportamiento de la mayoría de las instalaciones de la UE en 1996 – 1997.

Rango Total de Hornos de Fusión de Vidrio para envases				
Tipo de emisión	Sin eliminación secundaria Con o sin medidas primarias		Con eliminación secundaria	
	mg/Nm ³	kg/t vidrio fundido	mg/Nm ³	kg/t de vidrio fundido
NOx (como NO ₂)	400 – 5.000	0,6 - 11,7	<400	<0,74
SOx (como SO ₂)	100 – 4.500	0,2 - 9,8	100 – 1.637	0,2 - 3,4
Polvo	40 – 800	0,1 - 1,9	1 - 32	0,002 - 0,22
HCl	5 – 62	0,01 - 0,12	7 - 30	0,01 - 0,07
HF	1 – 70	$\leq 0,16$	$\leq 1 - 6$	$\leq 0,02$
Metales	$\leq 1 - 16$	$\leq 0,017$	$\leq 1 - 3$	$\leq 0,003$
Porcentaje de vidrio recuperado	5 - 95 %			
Mezcla típica	25 - 600 t/día			
Energía específica de fusión sólo incluido refuerzo	3,2 – 12,2 [GJ/t]			

Tabla 3.8: Rangos de emisiones totales reportados para hornos del Sector de Vidrio para envases con medidas de eliminación primarias y secundarias.

(Ver notas en la Tabla 3.9 siguiente)

Tipo de emisión	80% Medio (P10 a P90) Hornos de Fusión de Vidrio para envases Sin Eliminación Secundaria Con o sin medidas primarias		80% Medio (P10 a P90) Hornos de Fusión de Vidrio para envases Con Eliminación Secundaria	
	mg/Nm ³	kg/t. vidrio fundido	mg/Nm ³	kg/t. vidrio fundido
NOx (como NO ₂)	600 – 2.000	1,2 - 3,9	<400	<0,74
SOx (como SO ₂)	250 – 3.200	0,5 - 7,2	230 – 1.500	0,4 - 2,8
Polvo	100 - 270	0,2 - 0,6	2 - 32	0,002 - 0,05
HCl	10 - 40	0,02 - 0,08	7 - 30	0,01 - 0,06
HF	1 - 11	$\leq 0,027$	$\leq 1 - 5$	$\leq 0,011$
Metales	0,2 - 8	$\leq 0,016$	≤ 1	$\leq 0,002$
Porcentaje de casco de vidrio	18 - 80 %			
Mezcla típica	100 - 360 t/día			
Energía Específica Fusión sólo incl. refuerzo	3,9 – 6,4 [GJ/t]			

Tabla 3.9. Percentil 80 medio de los rangos de emisiones de los hornos del Sector de Vidrio para envases con medidas de eliminación primarias y secundarias.

Notas:

- ✓ La relación entre las emisiones en mg/Nm³ y kg/tonelada viene dada por el factor de volumen Nm³ de gas residual / tonelada de vidrio obtenido, del consumo de combustible, tipo de combustible y porcentaje de vidrio recuperado (el porcentaje de vidrio recuperado aplica una corrección al desgasado de materias primas).

- ✓ Las condiciones de referencia son: seco, temperatura 0°C (273K), presión 101.3 kPa, 8 % en volumen de oxígeno.

3.3.2.3. Actividades de Acabado

La aplicación de recubrimientos superficiales en caliente y los tratamientos superficiales en frío pueden dar origen a emisiones de humos y vapores, principalmente HCl y compuestos de estaño. Los niveles de emisiones varían de un proceso a otro y dependen de muchos factores. Las Normas VDI Alemanas (VDI 2578) indican las siguientes concentraciones registradas en los gases residuales de las actividades de aplicación de capas en caliente.

HCl	30 a 95 mg/Nm ³
Estaño (partículas)	0,006 a 10 mg/Nm ³
Estaño (gaseoso)	0,4 a 15 mg/Nm ³

Las masas emitidas son bastante bajas debido a las reducidas cantidades de sustancias utilizadas, y las concentraciones dependen en gran medida de la cantidad de aire de aspiración aplicado. Los métodos para controlar estas emisiones se discuten en el Capítulo 4. Hasta la fecha, el control de estas sustancias parece haberse concentrado en el control de los niveles de exposición en el lugar de trabajo. Si el gas residual con contenido de HCl del recubrimiento en caliente se combina con un gas residual con un cierto contenido orgánico, deberá prestarse atención al potencial de formación de dioxinas y furanos.

Los procesos de moldeo están muy mecanizados, lo que puede dar lugar a neblinas de aceites lubricantes, aunque se controlan según los niveles de exposición en el nivel de trabajo y no representan una emisión significativa a la atmósfera. No obstante, representan una posible fuente de contaminación por hidrocarburos de las evacuaciones de aguas residuales.

3.3.3. Emisiones al Agua

[tm18 CPIV]

Como se ha comentado anteriormente, los principales usos del agua en este sector son limpieza, sistemas de agua de refrigeración, enfriamiento de los rechazos de vidrio caliente, y humidificación de mezclas. Las emisiones acuosas se limitan a las purgas del sistema de agua de refrigeración, aguas de limpieza y circulación de aguas superficiales. Las aguas de limpieza no presentan ningún aspecto particular que no sea común en cualquier instalación industrial, esto es, la presencia de sólidos inertes y posiblemente de aceite. Las purgas del sistema de refrigeración contienen sales disueltas y productos químicos de tratamiento de aguas. La calidad del agua superficial dependerá del grado de separación de los desagües y de limpieza del centro.

Sólo el circuito para enfriar y fragmentar los desechos de vidrio calientes es particular de este sector. El agua reciclada puede contener partículas finas de vidrio de la fragmentación y de la acción de los sistemas de despegue mecánico utilizados para dragar el vidrio de las cubetas de agua. Las cintas transportadoras que llevan el vidrio al sistema de recogida pueden también llevar pequeñas cantidades de aceite de las máquinas y aceite o mezclas solubles de aceite y agua utilizadas en los mecanismos de corte y descarga. El circuito incluye pues generalmente un separador de sólidos y aceite, que también sirve para dar una inercia térmica adecuada al sistema durante el cambio de molde o en incidentes en las máquinas de moldeo, cuando deben enfriarse grandes cantidades de vidrio. Los sólidos de vidrio separados se reciclan normalmente con las materias primas. Normalmente se utiliza enfriamiento de circuito abierto para poder cubrir los incidentes graves más infrecuentes, en los que deben enfriarse grandes cantidades de vidrio caliente (fuga importante de un horno o incidente que causa la interrupción de las operaciones de moldeo).

Excluyendo el agua residual doméstica, los vertidos de agua normalmente sólo contienen sólidos,

algo de contaminación por aceite, y productos químicos para el tratamiento del sistema de agua. En el sector se utilizan técnicas de control de contaminación simples, como sedimentación, cribado, separadores de aceite y neutralización.

3.3.4. Otros Residuos

[tm18 CPIV]

Una característica del Sector de Vidrio para envases es que, salvo en casos excepcionales, todos los residuos de proceso pueden reciclarse directamente in situ. Esto incluye los rechazos de vidrio de las etapas de moldeo y control de calidad, pero también los residuos de la manipulación de materias primas, polvo de los equipos de aspiración y depósitos de sulfato de los conductos de gases residuales.

Al término de la campaña de un horno, toda su estructura refractaria se desmonta y sustituye. Estas operaciones producen entre 500 y 2.000 toneladas de materiales refractarios residuales, que se clasifican y se valorizan. Sólo una pequeña cantidad de estos materiales que no puede usarse para valorización es enviada al vertedero, si es necesario tras un tratamiento apropiado. Algunos materiales (Ej. refractarios de sílice) pueden molturarse y reciclarse al horno. No obstante, aunque su viabilidad técnica ha sido demostrada, el coste de la técnica es por lo general mayor que los enfoques alternativos como la eliminación o la valorización.

Las materias primas del vidrio son suministradas en general en gran volumen y no generan residuos de material de embalaje. Los residuos de las operaciones de embalaje de los productos (plástico, cartón y madera) normalmente se reutilizan o se reciclan a través de proveedores u otros canales apropiados. Otros residuos no específicos de la industria, como residuos de aceites, bidones y otros materiales de envasado, papel, baterías, trapos aceitosos, etc., se desechan por medios convencionales o, si procede, a través de una empresa externa.

3.3.5. Energía

[tm18 CPIV, tm14 ETSU]

La energía necesaria para fundir el vidrio representa por lo general más del 75% de los requisitos energéticos totales de la fabricación de vidrio para envases. Otras áreas importantes de uso energético son los antecuerpos, el proceso de moldeo (aire comprimido y aire de refrigeración del molde), el recocido, la calefacción de la fábrica y los servicios generales. En la Figura 3.1 se desglosa el uso típico de la energía por pasos de proceso.

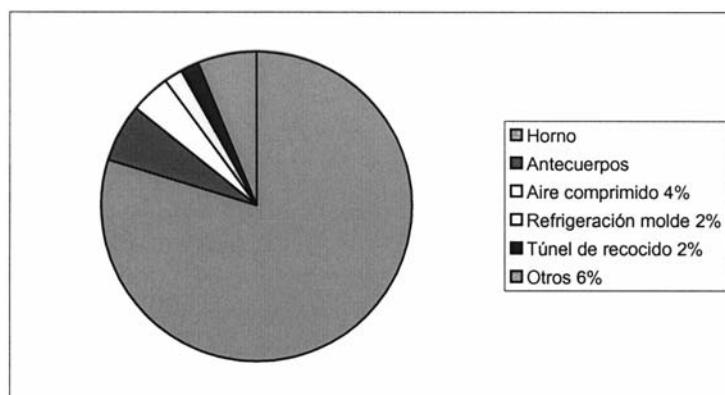


Figura 3.1: Uso de la energía en una planta típica de vidrio para envases

El fuel-oil pesado o el gas natural son las principales fuentes de energía para la fusión, en ocasiones con un pequeño porcentaje de refuerzo eléctrico (hasta un 5%). Existen algunos ejemplos de fusión totalmente eléctrica, pero son raros. Los antecuerpos y túneles de recocido se calientan a gas o electricidad. Se utiliza energía eléctrica para propulsar los compresores de aire y ventiladores necesarios para el proce-

so. Entre los servicios generales se incluye el bombeo de agua y, normalmente, la producción de vapor para el almacenaje de fuel-oil y calentamiento auxiliar, humidificación y calentamiento de la mezcla y en ocasiones para la calefacción de las naves. En algunos casos se han equipado hornos grandes con calderas de recuperación de calor para producir parte del vapor requerido.

El consumo de energía del proceso depende de muchos factores, y los principales son los descritos en la Sección 3.2.3. El rango de consumo energético registrado en el sector es extremadamente amplio (ver Tabla). No obstante, se estima que la mayoría de plantas se sitúan en el rango de 4.5 a 7.0 GJ/tonelada de vidrio fundido y 6.5 a 9.0 GJ/tonelada de productos acabados. Para algunos productos de muy alta calidad, esta cifra puede ser considerablemente mayor.

3.4 Vidrio Plano

La principal salida de un proceso de vidrio plano es por supuesto el producto, que representa aproximadamente el 70% de la entrada de materias primas. El resto consiste en gran parte en emisiones a la atmósfera, 10 – 20 %, compuestas principalmente de CO₂ de la descomposición de los carbonatos; y vidrio de desecho (recuperado), alrededor de un 10 – 20%, procedente del recorte de bordes, cambios de espesor-color y de roturas. El vidrio de desecho se recicla habitualmente de forma continua al horno, por lo que el producto suele representar de hecho alrededor del 85% de la entrada de materias primas.

3.4.1. Entradas al proceso

[tm18 CPIV]

Generalmente hay menos variación en la composición del vidrio plano que en otros sectores de la industria del vidrio. No obstante, distintos productores pueden escoger formas ligeramente distintas de alcanzar la composición final según las preferencias particulares o las variaciones en los suministros de materias primas. Puede haber diferencias particulares en la cantidad de vidrio de desecho empleado, en los colorantes y en los procesos de aplicación de capas en línea. Las principales materias primas básicas utilizadas en el sector se detallan en la tabla siguiente.

Materias primas de formación de vidrio	Arena de sílice, vidrio de desecho de proceso, (a veces también vidrio recuperado de consumo).
Materias primas fundentes, estabilizantes y afinantes	Carbonato sódico, piedra caliza, dolomita, sulfato sódico anhidro, sulfato cálcico y yeso, nitrato sódico, siemita nefelínica, feldespato, escoria de alto horno, carbono, polvo de filtro.
Agentes colorantes del vidrio	Dicromato potásico, óxido de hierro, óxido de cobalto, óxido de cerio, selenio metal o selenita con zinc.
Procesos de aplicación de capas en línea	Compuestos de silicio (Ej. tetracloruro de silicio, silano, carbonatos de silicio), haluros ácidos fuerte, compuestos de estaño orgánicos e inorgánicos.
Combustible	Fuel-oil, gas natural, electricidad, fuel-oil ligero de refuerzo
Agua	Suministro de agua corriente y fuentes naturales locales (pozos, ríos, lagos, etc.).
Materias primas auxiliares	Materiales de embalaje como plásticos, papel, cartón y madera. Lubricantes para maquinaria, predominantemente aceites minerales. Gases de proceso (nitrógeno, hidrógeno, oxígeno y dióxido de azufre). Estaño en el baño de flotación. Productos químicos para el tratamiento del agua de refrigeración y del agua residual.

Tabla 3.10: Materias primas utilizadas en el Sector de Vidrio Plano

Las principales entradas al proceso son las materias primas que contienen sílice (arena y vidrio de desecho) y los carbonatos (carbonato sódico, dolomita y piedra caliza). Las materias primas para la mezcla de vidrio se mezclan en la proporción correcta para producir la gama de composiciones de vidrio descritas en el Capítulo 2. En las composiciones típicas de vidrio flotado, los óxidos de silicio, sodio, calcio y magnesio representan alrededor del 98% del vidrio (SiO_2 72,6 %, Na_2O 13,6 %, CaO 8,6 %, y MgO 4,1 %). El óxido de sodio procede principalmente del carbonato sódico, el óxido cálcico principalmente de la dolomita y la piedra caliza, y el óxido de magnesio de la dolomita.

Excepto en casos excepcionales, las plantas de vidrio plano reciclan todo el vidrio de desecho interno directamente al horno. El vidrio plano se procesa generalmente en otros productos para los sectores de construcción y automoción, y en algunos casos se recicla también el casco de vidrio procedente de esta transformación. La cantidad de vidrio de desecho reciclado se encuentra generalmente limitada por la disponibilidad de vidrio de desecho de la calidad correcta y compatible químicamente. El total de casco de vidrio introducido en el horno está normalmente alrededor del 20%, pero puede estar entre el 10% y el 40% para un horno de vidrio flotado, y superar el 80% para otros tipos de vidrio plano. Cada vez más, el vidrio residual de los procesos de fabricación se reutiliza o recicla en las unidades de producción de vidrio plano, aunque los fabricantes de envases de vidrio o fabricantes de otros tipos de productos de vidrio pueden utilizar residuos ligeramente contaminados. Probablemente un 95% del vidrio residual de los procesos se recicla de un modo u otro.

Los procesos de aplicación de capas en línea son muy especializados y específicos de cada caso. La Tabla 3.10 indica algunas de las materias primas típicas utilizadas.

Al igual que en otros sectores de la Industria del Vidrio, los principales usos del agua son refrigeración, limpieza y humidificación de la mezcla. El vidrio plano se produce en forma de una lámina continua que sale del túnel de recocido a temperaturas de menos de 200 °C. La mayor parte del agua consumida en la fábrica se utiliza para enfriar o lavar esta lámina caliente, y no está contaminada (puede contener algo de Na_2SO_4). El consumo real de agua y las emisiones de vapor de agua pueden variar de acuerdo con las condiciones locales (Ej. la temperatura ambiente y la dureza del agua utilizada).

Los hornos de vidrio plano utilizan casi exclusivamente combustión a fuel-oil pesado o gas natural, en algunos casos con refuerzo eléctrico de hasta un 5% del aporte energético. Existen algunos hornos eléctricos de pequeña escala para aplicaciones especiales, y también existe un horno con combustión de oxí-combustión, puesto en servicio recientemente en EE.UU.

3.4.2. Emisiones a la Atmósfera

[tm18 CPIV]

3.4.2.1. Materias Primas

En la mayoría de plantas modernas, los silos y recipientes de mezcla están equipados con sistemas de filtros que reducen las emisiones de polvo a menos de 5 mg/Nm³. Las masas emitidas por los sistemas con filtros y sin filtros dependen del número de transferencias, y de la cantidad de materia manipulada.

3.4.2.2. Fusión

En el Sector de Vidrio Plano, el mayor potencial de emisiones al medio ambiente lo suponen las emisiones a la atmósfera de las actividades de fusión. Las sustancias emitidas y las fuentes asociadas se indican en la Sección 3.2.2.1. Casi todos los hornos de este sector son hornos regenerativos de llama transversal alimentados con combustibles fósiles (gas natural y fuel-oil).

En la Tabla 3.11 siguiente se facilita un resumen del rango de emisiones a la atmósfera. La tabla indica cifras separadas para hornos sin sistema de eliminación y para hornos con instalación de técnicas secundarias de eliminación. Los datos cubren los hornos alimentados tanto a gas como a fuel-oil para la producción de vidrio flotado transparente en condiciones operativas normales, e incluye únicamente mediciones de 1996 y 1997.

	Hornos sin Eliminación mg/Nm ³ (kg/t. vidrio fundido)	Hornos con Eliminación Métodos Primarios / Secundarios mg/Nm ³ (kg/ t. vidrio fundido)
Óxidos de Nitrógeno (como NO ₂)	1.800 – 2.870 (1,7 - 7,4)	495 – 1.250 (1,1 – 2,9)
Óxidos de Azufre (como SO ₂)	365 – 3.295 (1,0 - 10,6)	218 – 1.691 (0,54 - 4,0)
Partículas	99 - 280 (0,2 - 0,6)	5,0 - 40 (0,02 - 0,1)
Fluoruros (HF)	<1,0 - 25 (<0,002 - 0,07)	<1,0 - 4,0 (<0,002 - 0,01)
Cloruros (HCl)	7,0 - 85 (0,06 - 0,22)	4,0 - 30 (<0,01 - 0,08)
Metales	<1,0 - 5,0 (<0,001 - 0,015)	<1,0 (<0,001)

Tabla 3.11: Niveles de emisiones para hornos de vidrio plano con y sin eliminación

Las condiciones de referencia son: seco, temperatura 0°C (273K), presión 101.3 kPa, 8 % en volumen de oxígeno.

El término hornos sin eliminación hace referencia a hornos que funcionan normalmente sin tecnología específica de control de contaminación. Los valores de la tabla son mediciones reales reportadas pero, debido a que los datos hacen referencia a 1996 y 1997, falta un resultado importante. Se trata de la planta de Saint Gobain en Aniche, que utiliza el proceso FENIX y que el 1998 tenía niveles de emisiones de NOx de 510 mg/Nm³ y 1,1 kg/tonelada, con técnicas esencialmente primarias.

Para los hornos sin eliminación, los niveles de emisiones máximo y mínimo no eran sustancialmente distintos de los valores del percentil 80, y había demasiado pocos hornos con eliminación para que el análisis del percentil 80 fuera significativo (por ejemplo, sólo había 2 hornos que utilizaban técnicas de eliminación de NOx). Por consiguiente, los valores del percentil 80 no se presentan.

Para los hornos sin eliminación, las mayores emisiones de NOx correspondieron a las plantas con grandes cargas y combustión a gas, y las menores a las plantas con combustión a fuel-oil. Las dos emisiones con sistema de eliminación correspondieron a un horno que utilizaba 3R en dos tomas sólo, y a un horno con SCR.

Las mayores emisiones de SOx para los hornos sin eliminación corresponden a plantas con combustión de fuel-oil con un alto contenido de azufre, y las más bajas son de plantas con cargas bajas y combustión a gas con altos niveles de vidrio recuperado. Para los hornos sin eliminación, las mayores emisiones de HCl y HF corresponden a plantas con niveles relativamente altos de Cl y F en las materias primas. Las mayores emisiones de metales de los hornos sin eliminación corresponden a plantas con combustión a fuel-oil o a plantas que usan agentes colorantes (Se, Co, Fe y Cr), y las más bajas son de plantas con combustión a gas. Los rangos de emisiones de SOx, polvo, HCl, HF y metales de los hornos con eliminación estaban asociados con instalaciones que utilizaban sistemas de eliminación de partículas en combinación con lavado de gases ácidos, con objeto de cumplir los reglamentos locales para la concesión del permiso. Para los metales, esto significa que las emisiones estaban por debajo de los límites de detección.

3.4.2.3. Actividades de Acabado

Se ha observado que la emisión de estaño vapor del baño de flotación es muy baja y generalmente se controla solamente para asegurar que los niveles de exposición en el lugar de trabajo sean bajos. Este tema ya no vuelve a considerarse en este documento.

Los procesos de aplicación de capas en línea aplicados al vidrio plano son muy específicos de cada caso, y las materias primas empleadas y los contaminantes emitidos varían. No obstante, las emisiones contienen normalmente gases ácidos (HF, HCl) y partículas finas (Ej. óxidos de silicio y estaño). Este tipo

de proceso está normalmente sujeto a la legislación local medioambiental general, y los sistemas de eliminación se instalan conforme a la misma. Por ejemplo, HCl 10 mg/Nm³, HF 5 mg/Nm³, partículas 20 mg/Nm³, y compuestos de estaño 5 mg/Nm³.

3.4.3. Emisiones al Agua

Como se ha comentado anteriormente, los principales usos del agua en este sector son limpieza, refrigeración, y humidificación de mezclas. Las emisiones acuosas se limitan a las purgas del sistema de agua de refrigeración, aguas de limpieza y circulación de aguas superficiales. Las aguas de limpieza no presentan ningún aspecto particular que no sea común en cualquier instalación industrial, esto es, la presencia de sólidos inertes y de aceite. Las purgas del sistema de refrigeración contienen sales disueltas y productos químicos de tratamiento de aguas. La calidad del agua superficial dependerá del grado de separación de los desagües y de limpieza de la instalación.

Excluyendo el agua residual doméstica, las evacuaciones de agua normalmente sólo contienen sólidos, posiblemente algo de contaminación por aceite, y productos químicos para el tratamiento del sistema de agua. En el sector se utilizan técnicas de control de contaminación simples, como sedimentación, cribado, separadores de aceite y neutralización.

3.4.4. Otros Residuos

Siempre que es posible, los polvos de la sección de preparación de mezclas se devuelven a los silos de materias primas y se reutilizan en el proceso. Las mezclas rechazadas se realimentan gradualmente al proceso mediante la inclusión de pequeñas cantidades en las mezclas siguientes si es posible. Normalmente, un 99% del vidrio de desecho del final del proceso de fabricación de vidrio, recortes, rechazos y vidrio dañado es devuelto para ser fundido de nuevo.

Al término de la campaña del horno, la estructura refractaria (a veces hornos no regeneradores) se desmonta y sustituye. Al igual que en el Sector de Vidrio para envases, en la medida de lo practicable este material se recupera para su reutilización o reventa. Los aspectos relativos a materias primas que contienen cromo se discuten en la Sección 3.2.2.3.

Las materias primas del vidrio son suministradas en general en gran volumen y no generan residuos de material de embalaje. Los residuos de las operaciones de embalaje de los productos (plástico, cartón y madera) normalmente se reutilizan o se reciclan a través de proveedores u otros canales apropiados. Otros residuos no específicos de la industria se desechan por medios convencionales.

3.4.5. Energía [tm18 CPIV, tm14 ETSU]

La distribución del uso de la energía para un proceso típico de vidrio flotado se muestra en la Figura 3.2 siguiente, pero el uso energético en procesos particulares puede variar ligeramente. Puede observarse que más de tres cuartos de la energía utilizada en una planta de vidrio se gasta en la fusión del vidrio. El moldeo y el recocido suponen un 5% adicional del total. La energía restante se utiliza para servicios, sistemas de control, iluminación, calefacción de la fábrica y procesos post-moldeo, como inspección y embalaje.

Los hornos de vidrio flotado son casi exclusivamente con combustión a fuel-oil pesado o gas natural, en ocasiones con un refuerzo eléctrico de hasta un 5%. Muchos hornos tienen la capacidad de quemar fuel-oil o gas, o potencialmente ambos a la vez en quemadores distintos. Existen algunos ejemplos de hornos eléctricos, pero son a pequeña escala y para aplicaciones especiales. También hay un horno de oxi-combustión en EE.UU., que comenzó a funcionar en 1998.

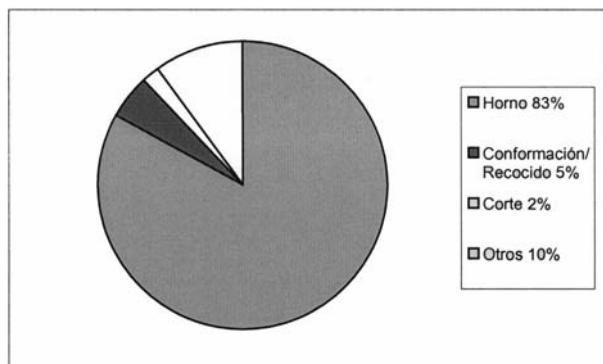


Figura 3.2: Uso de energía para un proceso típico de vidrio

Los antecuerpos (en vidrio laminado) y los hornos de recocido se calientan mediante gas o electricidad. La energía eléctrica se emplea para impulsar los compresores de aire y ventiladores necesarios para el proceso. Entre los servicios generales se incluye el bombeo de agua, normalmente la producción de vapor para almacenamiento de combustible y calentamiento auxiliar humidificación/calentamiento de la mezcla y en ocasiones calefacción de las naves. En algunos casos, los hornos grandes están equipados con calderas de recuperación para producir parte del vapor requerido.

El consumo de energía de proceso dependerá de muchos factores, los más importantes son los descritos en la Sección 3.2.3. El rango de consumo de energía encontrado en el sector es bastante estrecho, dado que hay una variación relativamente pequeña en el tipo de horno utilizado. Los niveles de energía para fusión están normalmente entre 5.5 y 8.0 GJ/tonelada de vidrio fundido, siendo los requisitos energéticos del proceso en su conjunto generalmente inferiores a 8,0 GJ/tonelada.

3.5. Fibra de Vidrio de Filamentos Continuos

La principal salida es el producto, que puede representar entre un 55% y un 80% de la entrada de materias primas. Las pérdidas se producen por emisiones a la atmósfera, residuos sólidos y residuos acuosos. El vidrio fundido representa alrededor del 80 – 85% de las entradas de materias primas al horno. La mayoría de las pérdidas están compuestas por emisiones gaseosas, particularmente CO₂ de la descomposición de los carbonatos. La fibra de desecho y el vidrio de drenaje pueden estar entre el 10 y el 30% de las entradas al proceso. La Tabla 3.12 siguiente muestra un resumen típico de entradas / salidas para la fabricación de fibra de vidrio de filamentos continuos.

	Cantidad / tonelada de producto			
	Entrada	Unidad	Salida	Unidad
Materias primas para el vidrio				
Sílice	300 - 457	kg		
Colemanita	141 - 250	kg		
Carbonato cálcico	300 - 411	kg		
Arcilla	395 - 544	kg		
Espato flúor	0 - 20	kg		
Otras	3 - 153	kg		
Emisiones a la atmósfera				
Polvo sin sistema de eliminación			1,4 - 4	kg
Polvo con sistema de eliminación			0,02 - 0,24	kg
CO ₂ de la descomposición de materias primas			120 - 200	kg
CO ₂ de la combustión			450 - 1.000	kg
Vapor de agua de combustión/descomposición materias primas			180 - 800	kg
Agua del proceso de secado			75 - 200	kg
NO _x (como NO ₂)			2,6 - 6,7	kg
SO _x (como SO ₂)			1 - 8	kg
HF			0 - 2	kg
HCl			0,03 - 0,12	kg
Agua de evaporación, enfriamiento...			3200	kg
COV en la zona de moldeo, hornos...			0,1 - 0,5	kg
Balance de productos aglomerantes				
(según suministro) Polímeros (~50 % sólidos)	20 - 40	kg		
(según suministro) Silanos	1 - 2	kg		
(según suministro) Lubricantes	1 - 5	kg		
(según suministro) Otros	0 - 10	kg		
(sólidos secos) Aglomerante en vidrio			4 - 20	kg
(sólidos secos) Aglomerante en agua residual			1 - 13	kg
(sólidos secos) Aglomerante en residuo sólido			<1	kg
(sólidos secos) Aglomerante en aire (ver COV sólo)				kg
Balance de agua				
Total	5.000 - 20.000	kg		
Agregada para el aglomerante	<200	kg		
Para refrigeración (agregada)	>1.500	kg		
Para rociado, limpieza	>3.000	kg		
En el vidrio de desecho			10 - 20	kg
En la cloaca			1500 - >6.000	kg
En el aire (hornos)			100 - 200	kg
Residuos sólidos (sólidos secos)				
Fibra de vidrio			60 - 250	kg
Residuos de aglomerante			1 - 13	kg
Energía				
Total	22,3 - 36	GJ		
Energía para fusión (Horno + Antecuerpos)	11,2 - 23	GJ		
Energía para moldeo (incluye hileras, bobinadoras, cuchillas directas, etc.)	2,5 ⁽¹⁾	GJ		
Energía para procesos (incluye horno, bobinadoras, cuchillas, etc.)	2,2 ⁽¹⁾	GJ		
Energía para servicios	1,1 ⁽¹⁾	GJ		
Calor emitido a través de la chimenea			1,8 - 2,9	GJ

Tabla 3.12: Resumen de las entradas y salidas para el Sector de Fibra de Vidrio de Filamentos Continuos [tm18 CPIV]

(1) Un horno de ejemplo

3.5.1. Entradas al Proceso

La composición química de la fibra varía según el tipo de vidrio y su uso final, y normalmente se expresa en términos de los óxidos de los elementos que contiene. Es difícil identificar una composición de mezcla “típica” aparte de la indicada en la Tabla 3.12 anterior. Las materias primas básicas se seleccionan y mezclan para dar las composiciones finales deseadas del vidrio tras la fusión. Los tipos de vidrio típicos y los rangos de sus composiciones se detallan en el Capítulo 2. La Tabla 3.13 siguiente muestra las principales materias primas utilizadas para conseguir estas composiciones.

Materias primas de formación de vidrio	Arena de sílice.
Materias primas fundentes, estabilizantes y afinantes	Carbonato cálcico, óxido cálcico, silicato de alúmina, colemanita, borato cálcico, bórax, ácido bórico, feldespato, espato flúor, sulfato cálcico, carbonato sódico, carbonato potásico, sulfato sódico, óxido de zinc, óxido de titanio o rutilo, óxido de zirconio, dolomita, óxido de hierro.
Materias primas de aplicación de capas	El material de recubrimiento variará según el uso final del producto. Los recubrimientos típicos son: formadores de película (Ej. acetato de polivinilo, almidón, poliuretano, resinas epoxi); agentes de acoplamiento (Ej. silanos organofuncionales); modificadores de pH (Ej. ácido acético, ácido clorhídrico, sales de amonio); y lubricantes (Ej. aceites minerales, surfactantes).
Aglomerantes para productos secundarios	Acetato de polivinilo, polvos de poliéster saturado, polvos de resina fenólica.
Combustibles	Fuel-oil, gas natural, electricidad.
Agua	Suministro de agua corriente y fuentes naturales locales (pozos, ríos, lagos, etc.).
Materias primas auxiliares	Materiales de embalaje como plásticos, papel, cartón, etc. Gases de proceso, oxígeno. Productos químicos para el tratamiento del agua de refrigeración y del agua residual.

Tabla 3.13: Materias primas utilizadas en el Sector de Fibra de Vidrio de Filamentos Continuos

Las principales entradas al proceso son la arena de sílice, los carbonatos y óxidos de metales alcalinos y alcalinotérreos, la alúmina y las materias primas que contienen boro. En la composición del Vidrio-E, los óxidos de silicio, sodio, potasio, calcio, magnesio, boro y aluminio representan más del 95% del vidrio. Los óxidos dominantes y los principales de los que se derivan son: SiO₂ (53 - 60 % - arena); CaO + MgO (20 - 24 % - piedra caliza, dolomita); B₂O₃ (0 - 10 % - colemanita, bórax, etc.); Al₂O₃ (11 - 16 % - alúmina); y Na₂O+ K₂O (<2 % - carbonato sódico / potasa).

Los materiales de recubrimiento representan un porcentaje muy pequeño de la masa del producto, normalmente de un 0.5 % a un 2 %. Consisten principalmente en soluciones acuosas de polímeros, normalmente con un 50% de sólidos, y cantidades menores de las otras materias primas especificadas en la Tabla 3.13.

El agua se utiliza para refrigeración, limpieza, preparación del recubrimiento, y en algunos casos para sistemas de lavado húmedo. Una de las características principales de la fabricación de fibras de vidrio es la necesidad de una gran cantidad de agua para refrigeración. Cada hilera requiere agua para reducir la temperatura del filamento muy rápidamente desde 1250 °C a temperatura ambiente. Este enfriamiento se consigue transfiriendo calor a las barras metálicas cerca de las puntas de las hileras, y refrigerando mediante agua circulante, paso de aire frío a través de los filamentos, y mediante atomizadores de agua. También se necesita agua de refrigeración alrededor del horno y los antecuerpos. El agua de refrigeración está normalmente en circuitos semicerrados, y los caudales totales suelen ser de varios miles de m³/h.

También se utilizan cantidades considerables de agua en la preparación de recubrimientos y en el lavado en la zona de moldeo / bobinado. El consumo total de agua por tonelada de producto acabado está normalmente entre 4 y 20 m³, mientras que las pérdidas del sistema de refrigeración suponen alrededor del 20% de esta cifra.

3.5.2. Emisiones a la Atmósfera

3.5.2.1. Materias Primas

En la mayoría de procesos modernos, los silos y recipientes de mezcla están equipados con sistemas de filtros que reducen las emisiones de polvo a menos de 5 mg/Nm³. Las masas emitidas por los sistemas con filtros y sin filtros dependen del número de transferencias, y de la cantidad de materia manipulada. El almacenamiento y la manipulación de los materiales de recubrimiento pueden también dar lugar a emisiones de polvo o de compuestos orgánicos volátiles (COV), pero generalmente son muy bajas y pueden controlarse mediante una buena práctica y aspiración local.

3.5.2.2. Fusión

{tm18 CPIV}

En el Sector de Fibra de Vidrio de Filamentos Continuos, el principal potencial de emisiones medioambientales lo representan las emisiones a la atmósfera de las actividades de fusión. Las principales sustancias emitidas y las fuentes asociadas se detallan en la Sección 3.2.2.1. El tipo de horno predominante en el sector es el horno recuperativo con combustión a gas natural, con la posibilidad de refuerzo eléctrico (algunos hornos tiene combustión a fuel-oil).

En la Tabla 3.14 siguiente se ofrece un resumen de las emisiones a la atmósfera. La tabla muestra las cifras para los métodos de eliminación primarios y secundarios. Las emisiones de polvo están compuestas principalmente de sulfatos y boratos alcalinos (Ej. sulfato sódico / potásico y borato sódico / potásico).

	Métodos de eliminación primaria, mg/Nm ³ [kg/tonelada vidrio fundido]	Métodos de eliminación secundaria, mg/Nm ³ [kg/ tonelada vidrio fundido]
Oxídos de Nitrógeno (como NO ₂)	670 – 1.600 [0,5 - 8,0]	No hay ejemplos de eliminación secundaria
Oxídos de Azufre (como SO ₂)	150 – 1.200 [0,75 - 6,0] (gas) hasta 3.000 [15] (fuel-oil)	No hay ejemplos de eliminación secundaria
Partículas	200 - 500 [1,0 - 2,5]	5 - 50 [0,025 - 0,25]
Fluoruros (HF)	10 - 50 [0,05 - 0,25] (sin adición de fluoruros) 50 - 400 [0,25 - 2,0] (con adición de fluoruros)	<20 [<0,1]
Cloruros (HCl)	<10 [<0,05]	<10 [<0,05]
Metales	<5 [<0,025]	<5 [<0,025]

Tabla 3.14: Niveles de emisiones para hornos de fibra de vidrio de filamentos continuos

Condiciones de referencia: seco, temperatura 0°C (273K), presión 101,3 kPa, 8 % en volumen de oxígeno.

Las emisiones más bajas de NOx hacen referencia a un horno de oxicombustión, por lo que no guarda relación con el mismo horno como la concentración más baja.

Los niveles de emisiones para un horno particular pueden depender de muchos factores, incluida la composición de la mezcla, las técnicas de eliminación utilizadas, y la edad del horno. Las emisiones de fluoruros están directamente relacionadas con el uso de compuestos que contienen fluoruros en la mezcla. En algunos casos se agregan fluoruros como materia prima para cumplir el requisito de la composición del vidrio, en otros se trata de una impureza de algunas materias primas. Sea cual fuere su origen, una parte de los fluoruros se emite en los gases residuales del horno. La concentración de flúor que se considera necesaria dependerá de factores técnicos específicos relativos al diseño del horno y del moldeo de las fibras, a la productividad y a los requisitos de diámetro de los filamentos del producto acabado.

3.5.2.3. Actividades de Acabado

[tm18 CPIV]

Las emisiones a la atmósfera de la aplicación de recubrimientos son bastante bajas, debido a la baja volatilidad general de los materiales de recubrimiento y las bajas temperaturas del vidrio en el punto de aplicación. No obstante, los caudales de aire en la zona de moldeo son muy elevados para asegurar un enfriamiento adecuado del vidrio, por lo que se produce un cierto arrastre de gotitas o evaporación de compuestos orgánicos. En la mayoría de los casos, el aire de refrigeración extraído se trata con sistemas de lavado con agua antes de su emisión o reciclaje parcial a la zona de moldeo. El alto volumen de aire de refrigeración significa que las concentraciones de las emisiones son por lo general bastante bajas. Mediciones limitadas (incluido el uso de recubrimientos con altos niveles de disolventes) han demostrado que las concentraciones de COV van desde niveles muy bajos hasta 20 mg/Nm³.

Los materiales de recubrimiento son generalmente a base de agua, y los aglomerados de fibras se secan a menudo en hornos. El proceso de secado dará lugar a emisiones de vapor de agua y de las sustancias que sean volátiles a las temperaturas de secado. Los recubrimientos se fijan químicamente al vidrio durante el proceso de secado, por lo que los niveles de emisiones son relativamente bajos. No obstante, las formulaciones de los recubrimientos, y por tanto las emisiones, pueden variar ampliamente, y sólo hay un número limitado de mediciones de años recientes. Estas muestran emisiones de COV que van desde lo apenas detectable a un máximo de 70 mg/Nm³, que equivale (en este ejemplo) a menos de 100 g/h.

Las emisiones pueden también derivarse de los procesos secundarios para producir mantas y tejidos, que comportan el uso de aglomerantes que deben curarse y secarse. De nuevo, hay muy poca información disponible, lo que indica una amplia variación según las técnicas y sustancias utilizadas. Las emisiones máximas de COV reportadas están entre 150 mg/Nm³ y 270 g/h.

3.5.3. Emisiones al Agua

[tm18 CPIV]

Las emisiones se derivan de la zona de moldeo, preparación de aglomerantes, limpieza, enfriamiento, aplicación de aglomerantes para tejidos o mantas, y de los sistemas de lavado a base de agua. La principal fuente de emisiones es la zona de moldeo. Debido a la alta velocidad de las bobinadoras (acción centrífuga) y al movimiento de los filamentos durante el proceso de moldeo, una parte del aglomerante aplicado sale despedido. Se recoge en la zona intermedia junto con el agua utilizada para limpiar periódicamente la zona de moldeo y bobinado. El agua pulverizada sobre los filamentos se recoge asimismo en el mismo lugar.

Pueden producirse emisiones en la zona de preparación de aglomerante a causa de vertidos y fugas que van a parar al sistema de desagüe. Los sistemas de agua de refrigeración de gran volumen requieren un corriente de purga, que contiene niveles bajos de productos químicos de tratamiento de agua. La mayoría de sistemas de lavado utilizados son con recirculación de agua, por lo que requieren una corriente de purga o evacuación periódica y sustitución del medio de lavado. El consumo total de agua por tonelada de producto acabado es normalmente de 4 a 20 m³, y las pérdidas del sistema de refrigeración (por purga y evaporación) representan alrededor del 20% de esta cifra. Con la excepción obvia de las pérdidas por evaporación, la mayor parte de esta agua se evacuan como agua residual. La práctica general dentro del sector es evacuar el agua a una planta de tratamiento de aguas residuales o realizar el tratamiento in situ.

Las concentraciones de contaminantes en las aguas residuales son generalmente muy bajas (menos de 0,2% de contenido de sólidos antes de cualquier tratamiento), debido a la dilución por agua de lavado, y su contenido es básicamente biodegradable. Los productos químicos utilizados no contienen metales pesados o sustancias listadas como peligrosas, pero la composición real varía ampliamente de un centro a otro, debido a la gran variedad de composiciones de aglomerantes. Para algunos productos sigue empleándose un agente de acoplamiento, aunque se va abandonando progresivamente.

3.5.4. Otros Residuos

[tm18 CPIV]

En la zona de preparación de mezclas pueden producirse residuos, derivados de mezclas descartadas y de vertidos o fugas. El proceso es muy sensible a la calidad de las materias primas y en general estos residuos se desechan en vertedero (5 a 50 toneladas anuales).

El vidrio fundido suministrado por el horno de fusión a los antecuerpos puede incluir pequeñas cantidades de impurezas (partículas sin fundir), que pueden causar roturas de filamentos en las hileras, lo que produce residuos de fibras de vidrio. Con el fin de reducir tales roturas, pueden instalarse conductos de drenaje en el fondo del canal que alimenta los antecuerpos con el fin de retirar el pequeño caudal de vidrio que contiene estas partículas más densas sin fundir. Cuando se utilizan conductos de drenaje, el vidrio drenado representa normalmente de un 1 a un 5% del vidrio fundido. El vidrio drenado puede procesarse como casco de vidrio y reciclarse internamente, o utilizarse en otras aplicaciones. El reciclaje interno de este material no es aconsejable normalmente, ya que supone devolver al horno las impurezas separadas, que irán a parar de nuevo a las hileras. Esto podría llevar a una acumulación gradual del material no fundible y potencialmente a un nivel más alto de vidrio drenado.

También se producen residuos de vidrio y fibra, debido a los cambios de producto, al cambio de embalaje y a las roturas de filamentos, cuando el vidrio sigue fluyendo pero no puede convertirse en producto vendible. La fabricación de filamentos de diámetro muy bajo (entre 5 μm y 25 μm) es difícil sin un cierto nivel de rotura.. En consecuencia, la cantidad de fibra de vidrio residual puede ser relativamente elevada, y normalmente forma uno de los principales caudales de residuos del proceso. La cantidad de residuos puede estar entre un 10 y un 25% de la cantidad total de vidrio fundido que sale del horno, según el tipo de proceso de moldeo y el diámetro de los filamentos. Estas cantidades pueden verse muy incrementadas cuando hay problemas con las materias primas, o con el comportamiento y estabilidad del horno. Las fibras de desecho contienen entre un 10 y un 25% de agua y aglomerante diluido.

La conversión del aglomerado en producto acabado produce una cantidad de residuos, según los productos, entre el 3 y el 10%. El material inservible es principalmente de la parte interna y externa de los aglomerados, pelusa, material dañado y descartado, muestras de prueba, recortes, etc. Normalmente, el desecho contiene material de recubrimiento en un nivel de 0.5 a 10 % (hasta 20 % para tejidos), y puede contener hasta un 15% de agua.

El polvo recogido en el equipo de eliminación puede reciclarse al horno. Si se utilizan técnicas de lavado seco, esto puede ser más difícil, siendo necesario realizar su mezcla o proceso.

3.5.5. Energía

[tm18 CPIV, tm14 ETSU]

La Figura 3.3 siguiente muestra la distribución del consumo energético para un proceso típico de filamentos continuos. El uso de energía en procesos particulares puede variar según el tamaño del horno de fusión y del tipo de procesos de acabado. Puede verse que, generalmente, más de tres cuartas partes de la energía se utiliza para la fusión. El moldeo, incluido el calentamiento de las hileras, y la conversión en producto representan alrededor del 15%, y la energía restante se utiliza para servicios, sistemas de control, iluminación, y calefacción de la fábrica.

La mayoría de hornos en este sector son hornos de recuperación con combustión a gas, algunos con refuerzo eléctrico (hasta un 20% de la energía de fusión). También hay ejemplos de hornos a fuel-oil, con combustión enriquecida con oxígeno, y algunos hornos con combustión de oxi-gas. La temperatura de precalentamiento del aire de los hornos de recuperación es menor que la de los hornos regenerativos, por lo que los requisitos energéticos son en consecuencia mayores por tonelada de vidrio. En este sector, la conductividad eléctrica del vidrio es muy baja, y actualmente la fusión eléctrica al 100% no se considera viable desde el punto de vista económico o técnico.

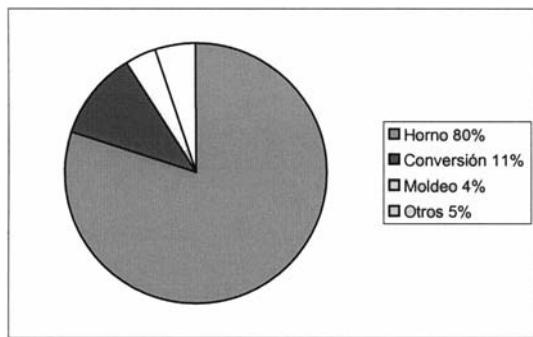


Figura 3.3: Consumo energético en un proceso típico de fibra de vidrio de filamentos continuos

El consumo de energía del proceso dependerá de muchos factores, los principales se detallan en la Sección 3.2.3. El consumo de energía para la fusión es normalmente de 11 a 23 GJ/tonelada de material fundido, aunque para algunos hornos que producen composiciones especializadas puede ser de hasta 30 GJ/tonelada. El consumo global de energía es normalmente del orden de 11 a 33 GJ/tonelada de producto. Las máximas temperaturas de bóveda en los hornos de fibra de vidrio de filamentos continuos son normalmente del orden de 1650 °C, es decir 50 °C mayores que en el vidrio para envases y 250 °C mayores que para la lana de vidrio. Las temperaturas de fusión más elevadas contribuyen a un consumo específico de energía relativamente alto en este sector.

3.6 Vidrio Doméstico

[tm27 Domestic]

Como se ha descrito en los Capítulos 1 y 2, el Sector del Vidrio Doméstico es muy diverso, y produce una amplia gama de productos a partir de distintas composiciones y tipos de hornos. Por consiguiente, hay una variación bastante amplia en las entradas y salidas de los procesos. En todos los demás sectores, la salida principal del proceso es el producto. En la producción de vidrio sodocálcico, el producto representa de un 50 a un 90% (85% de media) de la entrada de materia prima, mientras que para el vidrio al plomo esta cifra está entre el 35% y el 80% (75% de media). La baja cifra para el vidrio al plomo es debida a una serie de factores como la mayor cantidad de corte y pulido, así como mayores restricciones de calidad. Los otros tipos de cristal doméstico (cristal, opalino, borosilicato y vitrocerámica) presentan valores entre los dos extremos. La Tabla 3.15 siguiente resume los principales parámetros de entradas y salidas para vidrio sodocálcico y vidrio al plomo, y de nuevo los valores para los otros tipos de vidrio doméstico se sitúan entre los ejemplos indicados.

		Vidrio sodocálcico	Vidrio al plomo
	Unidades / tonelada de vidrio fundido	rango (valor medio)	rango (valor medio)
Entradas			
Energía, fuel-oil/ gas	GJ	5 - 14 (9)	0,5 - 5 (3)
Energía, electricidad	GJ	1 - 4 (2,5)	1 - 6 (4)
Arena de sílice	tonelada	0,65 - 0,75 (0,6)	0,20 - 0,50 (0,42)
Carbonatos	tonelada	0,3 - 0,42 (0,34)	0,08 - 0,20 (0,14)
Oxido de plomo	tonelada		0,08 - 0,21 (0,18)
Ingredientes minerales menores	tonelada	0,02 - 0,08 (0,04)	0,005 - 0,02 (0,01)
Vidrio de desecho interno	tonelada	0,15 - 0,4 (0,25)	0,25 - 0,65 (0,35)
Materiales de embalaje	tonelada	0,06 - 0,20 (0,1)	0,06 - 0,20 (0,1)
Moldes y otros	tonelada	0,001 - 0,003 (0,002)	0,001 - 0,003 (0,002)
Agua	m ³	4 - 9 (7)	3 - 70 (7,5)
Ácido fluorhídrico (100 %)	kg/t. vidrio pul. ác. ⁽¹⁾		40 - 130 (65)
Ácido sulfúrico (96 %)	t./t. HF(100 %) ⁽¹⁾		1 - 10 (5)
Hidróxido sódico	t./t. HF(100 %) ⁽¹⁾		0 - 0,2 (0,1)
Hidróxido cálcico	t./t. HF(100 %) ⁽¹⁾		1 - 10 (4)
Agua de lavado fresca	t./t. HF(100 %) ⁽¹⁾		0,025 - 0,07 (0,05)
Salidas			
Productos acabados y embalados	tonelada	0,5 - 0,9 (0,85)	0,35 - 0,8 (0,75)
Emisiones a la atmósfera	kg		
CO ₂		150 - 1.000 (700)	150 - 400 (300)
NO _x		0,9 - 11 (4,8)	0,9 - 5,0 (1)
SO _x		0,1 - 2,8 (0,7)	0,1 - 1,0 (0,2)
Polvo		0,001 - 0,8 (0,4)	0,001 - 0,1 (0,02)
H ₂ O		60 - 500 (300)	60 - 250 (120)
Agua residual	m ³	3,6 - 9,1 (6,3)	2,7 - 70 (6,8)
Vidrio de desecho interno	tonelada	0,15 - 0,4 (0,25)	0,25 - 0,65 (0,35)
Residuo a reciclaje	kg	10 - 60 (30)	10 - 60 (30)
Otros residuos	kg	6 - 50 (10)	6 - 50 (10)
Residuo a reciclaje			
PbSO ₄ O ₂ PbCO ₃	t./t. HF(100 %) ⁽¹⁾		0,2 - 1,5 (0,8)
CaSO ₄	t./t. HF(100 %) ⁽¹⁾		2 - 20 (7,5)
Residuo a vertedero			
Lodo de corte	t./t. HF(100 %) ⁽¹⁾		0,3 - 0,7 (0,45)
Lodo con metales pesados	t./t. HF(100 %) ⁽¹⁾		0,1 - 0,5 (0,3)

Tabla 3.15: Resumen de Entradas y Salidas del Sector de Vidrio Doméstico

(1) Por lo que respecta al pulido con ácido, el consumo de ácido fluorhídrico 100% es el mejor parámetro de referencia, ya que tiene en cuenta la relación superficie/volumen. El consumo de ácido fluorhídrico 100%/tonelada de vidrio pulido al ácido dependerá de la relación superficie/volumen y en consecuencia de los tipos de artículos que se pulen.

3.6.1. Entradas al proceso

Las entradas al proceso variarán según el producto fabricado y la composición requerida del vidrio. Los principales tipos de vidrio son sodocálcico, vidrio al plomo, cristal de borosilicato, opaco y vitrocerámicas. Las principales materias primas utilizadas en el sector se detallan en la Tabla 3.16 siguiente.

Materias primas de formación de vidrio	Arena de sílice, vidrio de desecho del proceso.
Materias primas fundentes, estabilizantes y afinantes	Carbonato sódico, carbonato potásico, piedra caliza, dolomita, sulfato sódico, alúmina, siemita nefelínica, nitrato sódico, nitrato potásico, bórax, arsénico, antimonio, carbono, óxido de plomo, espato flúor.
Agentes colorantes y decolorantes del vidrio	Óxidos de cromo, hierro, cobalto, cobre, manganeso, níquel, y selenita con selenio o zinc, cerio.
Agentes de recubrimiento de los productos	Cloruros metálicos inorgánicos u orgánicos. Principalmente tetracloruro de estaño, tetracloruro de estaño, y cloruro de monobutilestaño.
Lubricantes de los productos	Lubricantes a base de polietileno y ácidos grasos (Ej. ácido oleico).
Combustibles	Fuel-oil, gas natural, electricidad, butano, propano, acetileno.
Agua	Agua corriente y fuentes naturales locales (pozos, ríos, lagos, etc.).
Materias primas auxiliares	Materiales de embalaje como plásticos, papel, cartón, y madera. Lubricantes de moldes, generalmente agentes de desprendimiento a alta temperatura a base de grafito. Lubricantes de maquinaria, principalmente aceites minerales. Gases de proceso, oxígeno e hidrógeno. Materias primas de pulido, principalmente ácidos minerales fuertes (HF, H ₂ SO ₄), también NaOH. Materiales decorativos, esmaltes, arenas. Productos químicos para el tratamiento del agua de refrigeración y del agua residual.

Tabla 3.16: Materias primas utilizadas en el Sector de Vidrio Doméstico

Las materias primas de la mezcla de vidrio se mezclan en la proporción correcta para producir la composición de vidrio deseada. Para el vidrio sodocálcico, los óxidos de silicio, sodio y calcio representan más del 90% del vidrio (SiO_2 71 - 73 %, Na_2O 12 - 14 % y CaO 10 - 12 %). El dióxido de silicio procede principalmente de arena y vidrio de desecho. El óxido sódico procede principalmente del carbonato sódico, y el óxido de calcio básicamente de la piedra caliza. La composición típica del vidrio al plomo es SiO_2 54 - 65 %, PbO 25 - 30 %, Na_2O o K_2O 13 - 15 %, más otros componentes minoritarios. En las formulaciones de cristal, el óxido de plomo es sustituido total o parcialmente por óxidos de bario, zinc o potasio. Los límites se definen en la Directiva 69/493/CEE.

Los vidrios de borosilicato contienen trióxido de boro (B_2O_3) y un mayor porcentaje de dióxido de silicio. Una composición típica es 70 - 80 % SiO_2 , 7 - 15 % B_2O_3 , 4 - 8 % Na_2O o K_2O , y 2 - 7 % de óxido de aluminio, Al_2O_3 . El trióxido de boro procede del bórax u otros compuestos que contienen boro, y el óxido de aluminio se deriva principalmente de la alúmina.

Los vidrios opacos están compuestos principalmente de los óxidos de silicio, sodio, calcio, aluminio y potasio, aunque también contienen alrededor de un 4 - 5 % de fluoruros, derivados de minerales como el espato flúor. Los óxidos predominantes de la vitrocerámica son lo de silicio, aluminio, sodio y calcio con porcentajes menores de magnesio, bario, zinc, zirconio, litio y titanio. El uso de vidrio recuperado en el sector varía, la mayoría de procesos reciclan vidrio de desecho interno, pero normalmente no se utiliza vidrio recuperado externo debido a consideraciones de calidad.

El Sector del Vidrio Doméstico utiliza distintos tipos de agentes de afino, como nitratos, sulfatos, y

en algunos casos específicos compuestos de arsénico y antimonio, normalmente en las proporciones de As 0,1 - 1 % y Sb 0,1 – 0,4 %. También se utiliza selenio, como agente decolorante, normalmente <1 % de la mezcla. En la producción de vidrio al plomo, normalmente es necesario pulir el vidrio tras el corte, actualmente la forma más común de hacerlo es mediante inmersión en una mezcla concentrada de ácidos fluorhídrico y sulfúrico, y luego enjuagar con agua. Algunos productos reciben tratamientos superficiales similares a los del Sector de Vidrio para envases descritos en la Sección 3.3.

Los combustibles utilizados varían de un proceso a otro, aunque en general para la fusión del vidrio se emplea gas natural, fuel-oil y electricidad, por separado o en combinación. Los antecuerpos y túneles de recocido se calientan con gas o electricidad, que también se utilizan para calefacción y servicios generales. El fuel-oil ligero, propano y butano se utilizan en ocasiones como combustibles de refuerzo y para acabado superficial (también acetileno).

En general, los usos principales del agua en el Sector de Vidrio Doméstico son para los circuitos de refrigeración y para limpieza. El agua de refrigeración se utiliza, normalmente en circuitos cerrados o abiertos, para refrigerar diversos equipos, con las correspondientes pérdidas por evaporación y purgas. El agua se utiliza asimismo en determinados pasos de acabado (corte, pulido, lavado, etc.) y en los sistemas de lavado húmedo. Por consiguiente, el consumo de agua real puede variar según las condiciones locales (Ej. temperatura ambiente y dureza del agua suministrada).

3.6.2. Emisiones a la Atmósfera

[tm27 Domestic]

3.6.2.1. Materias Primas

En la mayoría de procesos modernos de vidrio doméstico, los silos y recipientes de mezcla están equipados con sistemas de filtros que reducen las emisiones de polvo a menos de 5 mg/Nm³. Las masas emitidas por los sistemas con filtros y sin filtros dependen del número de transferencias, y de la cantidad de materia manipulada. No obstante, una característica de este sector es que algunas secciones de preparación de mezclas son relativamente pequeñas y, debido a la naturaleza especializada y bajos volúmenes de algunos de los productos, existe un alto nivel de manipulación y transferencia manual (y semimanual). Las emisiones de estas actividades dependen de la calidad del control de los sistemas, lo que se discute con mayor detalle en el Capítulo 4. Evidentemente, cuando se manipulan materias primas que contienen compuestos con mayor potencial tóxico (Ej. óxido de plomo, arsénico, etc.), existe el potencial de emisión de estas sustancias. Normalmente se utilizan controles específicos para prevenir las emisiones (Ej. aspiración de polvo y manipulación neumática) y en consecuencia los niveles de emisión son normalmente muy bajos.

3.6.2.2. Fusión

[tm27 Domestic]

En el Sector de Vidrio Doméstico, el mayor potencial de emisiones medioambientales lo representan las emisiones a la atmósfera de las actividades de fusión. Las principales sustancias emitidas y sus fuentes asociadas se identifican en la Sección 3.2.2.1. En este sector hay una amplia gama de productos, y pueden encontrarse la mayoría de las técnicas de fusión descritas en el Capítulo 2. Los combustibles pueden ser gas natural, fuel-oil o electricidad. En la Tabla 3.17 siguiente se da un resumen del rango de las emisiones a la atmósfera. Estos datos son sólo para emisiones de hornos de vidrio sodocálcico y de vidrio al plomo. Estas cifras, tomadas conjuntamente, se considera que representan el rango completo del sector, y las emisiones de los otros tipos de vidrio se encuentran entre las de los ejemplos dados.

Sustancia	Vidrio sodocálcico (media)		Vidrio al plomo (media)	
	mg/Nm ³	kg/t. material fundido	mg/Nm ³ ⁽¹⁾	kg/t. material fundido
Óxidos de Nitrógeno (como NO ₂)	140 – 5.500 ⁽²⁾ (2.300)	0,9 - 11 (4,8)	1.000 – 2.000 (1.500)	0,9 – 5,0 (1)
Oxídos de Azufre (como SO ₂)	50 – 1.000 (250)	0,1 – 2,8 (0,7)		0,1 - 1 (0,2)
Partículas	0,5 - 400 (200)	0,001 – 0,8 (0,4)	2 - 10 (5)	0,001 – 0,1 (0,02)
Fluoruros (HF)	<5		0,1 - 1,0 (0,5)	0,0002 – 0,004 (0,0003)
Cloruros (HCl)	<10		0,5 - 5,0 (2,0)	0,001 – 0,003 (0,002)
Metales (incluido plomo)	<5		0,05 – 0,5 (0,2)	0,0001 – 0,035 (0,01)

Tabla 3-17: Resumen de las emisiones a la atmósfera de los hornos de vidrio doméstico(1) *Datos relativos a hornos convencionales (es decir, no eléctricos)*(2) *Algunos resultados elevados guardan relación con el uso de nitratos en la mezcla o con otras condiciones específicas (Ej. ritmo de producción muy bajo).*

Los niveles de emisiones de un determinado horno pueden depender de muchos factores, como la composición de la mezcla, las técnicas de eliminación utilizadas, y la edad del horno. Las emisiones de fluoruros, plomo y otros metales están directamente relacionadas con el uso de compuestos que contienen estas sustancias. En algunos casos se agrega fluoruro como materia prima por requisito de la composición del vidrio; en otros, se trata de una impureza de algunas materias primas. Una parte del material se incorporará al vidrio, pero una parte se emitirá inevitablemente a la atmósfera. Los fluoruros se emiten normalmente como HF, mientras que los metales pueden emitirse en forma de vapores o, más frecuentemente, estar contenidos en las partículas.

3.6.2.3. Actividades de Acabado

Los productos de vidrio sodocálcico pueden recibir la aplicación de tratamientos superficiales. Los tratamientos y emisiones son similares a los descritos para el vidrio para envases en la Sección 3.3.2. Muchos productos se acaban al fuego, lo que no da origen a emisiones aparte de los productos de combustión de la llama. El pulido al ácido de los productos de vidrio al plomo puede producir emisiones de vapores ácidos (HF y SiF₄), que normalmente se tratan en torres de lavado mediante circulación de agua o de una solución alcalina (Ej. hidróxido sódico). Las emisiones de estos procesos tienden a ser bastante bajas tras el lavado. Las actividades de satinado o mateado y corte pueden dar lugar a emisiones de polvo. Normalmente se controlan mediante corte sumergido o aspiración de aire local.

3.6.3. Emisiones al Agua

[tm27 Domestic]

Al igual que en otros sectores de la industria, los principales usos del agua son para refrigeración y limpieza. Las emisiones acuosas se limitan a las purgas del sistema de agua de refrigeración, aguas de limpieza y circulación de aguas superficiales. Las aguas de limpieza no presentan ningún aspecto particular que no sea común en cualquier instalación industrial, esto es, la presencia de sólidos inertes y de aceite. Las purgas del sistema de refrigeración contienen sales disueltas y productos químicos de tratamiento de aguas. La calidad del agua superficial dependerá del grado de separación de los desagües y de limpieza de la instalación.

No obstante, la producción de determinados productos, en particular los vidrios que contienen plomo, puede dar lugar a otras emisiones directas, que pueden contener plomo u otros compuestos. Las principales fuentes potenciales de aguas residuales contaminadas son: aguas de limpieza de zonas en las que puedan haberse producido vertidos de materias primas de la mezcla (pueden contener plomo, arsénico, antimonio, etc.); y el agua empleada en el corte y esmerilado de los productos. La mayoría de proce-

sos utilizan técnicas para eliminar sólidos, como sedimentación, precipitación o floculación, para poder cumplir con las normativas locales. Son frecuentes niveles de plomo de menos de 1 mg/l.

El pulido al ácido también produce emisiones al agua. Tras ser sumergido en el ácido, el vidrio tiene una capa de sulfato de plomo y hexafluorosilicatos en su superficie. Esta capa se quita mediante lavado con agua caliente, que se hace ácida y contiene sulfato de plomo. Según los productos químicos utilizados para neutralizar esta agua, el sulfato de plomo puede seguir reaccionando (Ej. formando CaSO_4 con Ca(OH)_2), cambiando la forma del plomo.

El proceso de pulido produce asimismo la disolución de un pequeño porcentaje del vidrio, que precipita parcialmente del baño ácido como una mezcla de sales, que tras la separación da un “lodo de pulido al ácido”. Este lodo se procesa mediante filtrado y lavado para obtener sulfato de plomo, o mediante reacción con carbonato cálcico o sódico para obtener carbonato de plomo. Ambos productos pueden reutilizarse como materias primas (reintroducirse en la mezcla) o recuperarse. La fracción líquida del proceso del lodo de pulido al ácido da una solución ácida que se reutiliza en el baño de pulido.

Los vapores del baño ácido reaccionan en el agua, dando ácido hexafluorosilícico (H_2SiF_6) con concentraciones de hasta un 35%. Esta agua ácida debe neutralizarse antes de su evacuación. Alternativamente, el ácido puede recuperarse en algunas circunstancias y venderse a la industria química.

3.6.4. Otros Residuos

La mayor parte del vidrio de desecho (casco) se recicla de nuevo al horno, por lo que los niveles de residuos son generalmente bastante bajos. Los residuos generales de embalajes y reparación de hornos son similares a los de otros sectores. Los residuos de los sistemas de control de polvo y de lavado seco se reciclan por lo general al horno. En la producción de vidrio al plomo, los lodos separados del sistema de aguas residuales deben desecharse en caso de no poder reutilizarse. La formación del lodo se discute en la Sección 3.6.3 anterior, y las cifras se indican en la Tabla 3.15.

3.6.5. Energía

[tm14 ETSU]

La consideración del consumo energético en este sector es bastante difícil debido a su diversidad y la amplia gama de técnicas de fusión empleadas. La producción a gran escala de vajillas de vidrio sodocálcico tiene mucho en común con la producción de vidrio para envases, ver Sección 3.3.5, y muestra una distribución comparable del consumo energético. No obstante, un gran porcentaje del consumo energético está asociado con operaciones de acabado (Ej. pulido al fuego y acabado). El consumo específico de energía para la fusión es mayor en este sector que para el vidrio para envases. Esto es debido a que los hornos tienden a ser más pequeños, las temperaturas de fusión son ligeramente mayores, y el tiempo de estancia en el horno es hasta un 50% más largo.

Otros procesos del sector, particularmente la producción de vidrio al plomo, se realizan a una escala mucho menor, por lo que pueden usarse hornos de crisoles. La distribución del consumo energético para la fabricación de vidrio al plomo de alta calidad en hornos de crisoles se muestra en la Figura 3.4 siguiente. No es representativa del sector en su conjunto.

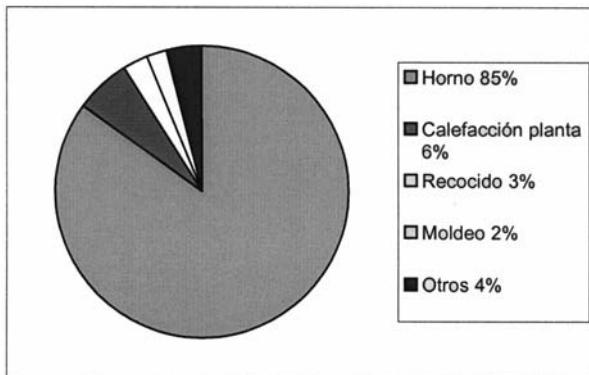


Figura 3.4: Consumo energético en la fabricación de vidrio al plomo (horno de crisoles)

El consumo global de energía para la fabricación de vidrio al plomo puede llegar a ser de 60 GJ/tonelada de producto acabado, cuando los requisitos energéticos calculados son sólo de alrededor de 2,5 GJ/tonelada. La diferencia puede ser debida a muchos factores, pero los principales son:

- Los elevados requisitos de calidad puede producir altos niveles de rechazos. El crisol es disuelto lentamente por el vidrio, lo que produce cordones y piedras en el producto.
- El vidrio se trabaja frecuentemente a mano, el rendimiento del moldeo puede estar por debajo del 50%, y es posible que haya que recalentar los artículos durante el moldeo.
- Los crisoles deben “fundirse” o calentarse a alta temperatura antes de su uso, por lo que tienen una vida útil muy corta en comparación con los hornos continuos.

La fusión eléctrica de vidrio al plomo permite el uso de refractarios de alta calidad, que dan una calidad mucho mayor al vidrio y por consiguiente un índice de rechazos más bajos y un mejor rendimiento. La naturaleza continua de la fusión eléctrica significa asimismo que frecuentemente va asociada con un moldeo automático más eficaz. Estos factores pueden producir un consumo energético cercano a la cifra de 2,5 GJ/tonelada de producto. Otras técnicas de fusión continuas o semicontinuas pueden producir un mayor grado de eficacia energética.

3.7. Vidrio Especial

El Sector del Vidrio Especial es muy diverso y con una gama muy amplia de productos, formulaciones y técnicas de proceso. Muchas instalaciones no cumplen los criterios de 20 toneladas/día especificados en la Directiva 96/61/CE a menos que estén asociadas con otros hornos. Por consiguiente, no es factible ni necesariamente útil intentar resumir e rango completo de emisiones de la totalidad del sector. No obstante, más del 70% de la capacidad del sector lo componen el vidrio para TV y el vidrio soluble. Esta sección intenta, a ser posible, cubrir la totalidad del sector, pero sólo se facilita información cuantitativa para la fabricación de vidrio para TV y vidrio soluble.

3.7.1. Entradas al Proceso

[tm25 Special]

La composición química del vidrio varía según el tipo de vidrio y su uso final, y generalmente se expresa en términos de los óxidos de los elementos que contiene. Es difícil señalar composiciones de mezclas “típicas” para un sector tan diverso. Las materias primas básicas se seleccionan y mezclan para obtener las composiciones finales deseadas del vidrio tras la fusión. Los tipos de vidrio y rangos de composición típicos se indican en el Capítulo 2. La Tabla 3.18 siguiente muestra las materias primas empleadas para obtener estas composiciones.

En las Tablas 3.19, 3.20 y 3.21 se da información más detallada de las entradas para la producción de vidrio soluble y vidrio para TV. Estos datos son para tres procesos específicos de ejemplo.

Materias primas de formación de vidrio	Arena de sílice, vidrio de desecho de proceso.
Materias primas fundentes, estabilizantes y afinantes	Carbonato sódico, carbonato potásico, piedra caliza, dolomita, sulfato sódico, alúmina, nitrato sódico, nitrato potásico, bórax, ácido bórico (puro para algunas aplicaciones), arsénico (As_2O_3), antimonio (Sb_2O_3), carbono, óxido de plomo, carbonato de estroncio, espato flúor, sienita nefelínica, feldespatos, cloruro sódico.
Agentes colorantes del vidrio	Cromito de hierro, óxido de hierro, óxido de cobalto, selenito de zinc o selenio, cerio.
Combustibles	Fuel-oil, gas natural, electricidad, butano, propano, acetileno.
Agua	Suministro general y fuentes naturales locales (pozos, ríos, lagos, etc.).
Materias primas auxiliares	Materiales de embalaje como plásticos, papel, cartón, y madera. Lubricantes de moldes, generalmente agentes de desprendimiento a alta temperatura a base de grafito. Lubricantes de maquinaria, principalmente aceites minerales. Gases de proceso, oxígeno, hidrógeno y dióxido de azufre. Productos químicos para el tratamiento del agua de refrigeración y del agua residual.

Tabla 3.18: Materias primas utilizadas en el Sector de Vidrio Especial

ENTRADAS/ tonelada de vidrio soluble	SALIDAS	
Materias primas	Producto, vidrio soluble	1.000 kg
Arena (seca)	Emisiones a la atmósfera	
772,1 kg	Fluoruro (HF)	0,4 g
Carbonato sódico	Dióxido de carbono	540 kg
399,6 kg	Monóxido de carbono	0,258 kg
Materias primas auxiliares	Cloruros (HCl)	0,024 kg
Agua (producción de vapor)	Óxidos de azufre (como SO_2)	1,322 kg
7,3 kg	Polvo	0,212 kg
Productos químicos tratamiento agua	Óxidos de nitrógeno (como NO_2)	2,028 kg
0,1 kg	Agua residual	0,28 m ³
Consumo de agua	DBO	0,17 g
Agua de proceso	DQO	0,003 g
0,28 m ³	Sólidos en suspensión	4,2 g
Agua de refrigeración	Residuos sólidos	0,65 kg
0,94 m ³		
Agua de lavado		
0,18 m ³		
(agua reciclada)		
68 kg		
Energía *		
Total		
6053 MJ		
Recuperada		
708 MJ		
Consumo		
5.344 MJ		

Tabla 3.19: Resumen de entradas y salidas para un ejemplo de proceso de vidrio soluble [tm28 EMPA]

(* Este proceso estaba equipado con una caldera de recuperación)

ENTRADAS / tonelada de vidrio fundido		SALIDAS / tonelada de vidrio fundido	
Materias primas		Producto, embudos de tubos de TV 1.000 kg	
Arena	327 kg	Emisiones a la atmósfera	
Carbonato sódico	53 kg	Polvo	6,1 g
Piedra caliza	35 kg	Óxidos de nitrógeno (como NO ₂)	12.000 g
Dolomita	18 kg	Óxidos de azufre (como SO ₂)	71,4 g
Feldespato	35 kg	Plomo	1,4 g
Oxido de plomo	140 kg	Otros metales	0,14 g
Potasa	70 kg	Cloruros (HCl)	9,24 g
Nitrato sódico, compuestos de Ba, Sb y, Zr	47 kg	Fluoruros (HF)	1,37 g
Vidrio de desecho del proceso	20 %	Otros	
Otros residuos (polvo de filtro, etc.)	20 %	Agua residual	
Materias primas auxiliares		DBO	20,9 g
Agua de refrigeración (ver agua de proceso)	-	DQO	107,4 g
Agua de proceso	3,6 m ³	AOX	0,2 g
Productos químicos tratamiento agua	0,43 kg	Residuos sólidos	
Lubricantes, pulido, esmerilado	0,33 kg	Total	15,5 g
Energía		De los cuales metales pesados	
Electricidad	893 MJ		2,7 g
Gas natural	268 m ³		
Gases técnicos	1,4 m ³		

Tabla 3.19: Resumen de entradas y salidas para un ejemplo de proceso de vidrio para embudos de tubos de rayos catódicos

ENTRADAS / tonelada de vidrio fundido		SALIDAS / tonelada de vidrio fundido	
Materias primas		Producto, embudos de tubos de TV 1.000 kg	
Arena	327 kg	Emisiones a la atmósfera	
Carbonato sódico	53 kg	Polvo	6,1 g
Piedra caliza	35 kg	Óxidos de nitrógeno (como NO ₂)	12.000 g
Dolomita	18 kg	Óxidos de azufre (como SO ₂)	71,4 g
Feldespato	35 kg	Plomo	1,4 g
Oxido de plomo	140 kg	Otros metales	0,14 g
Potasa	70 kg	Cloruros (HCl)	9,24 g
Nitrato sódico, compuestos de Ba, Sb y, Zr	47 kg	Fluoruros (HF)	1,37 g
Vidrio de desecho del proceso	20 %	Otros	
Otros residuos (polvo de filtro, etc.)	20 %	Agua residual	
Materias primas auxiliares		DBO	20,9 g
Agua de refrigeración (ver agua de proceso)	-	DQO	107,4 g
Agua de proceso	3,6 m ³	AOX	0,2 g
Productos químicos tratamiento agua	0,43 kg	Residuos sólidos	
Lubricantes, pulido, esmerilado	0,33 kg	Total	15,5 g
Energía		De los cuales metales pesados	
Electricidad	893 MJ		2,7 g
Gas natural	268 m ³		
Gases técnicos	1,4 m ³		

Tabla 3.20: Resumen de entradas y salidas para un ejemplo de proceso de vidrio para paneles de tubos de rayos catódicos (SCR integrada para reducción de NO_x)

3.7.2. Emisiones a la Atmósfera

3.7.2.1. Materias Primas

En la mayoría de procesos modernos de vidrio especial, los silos y recipientes de mezcla están equipados con sistemas de aspiración que reducen las emisiones de polvo a menos de 5 mg/Nm³. Las masas emitidas por los sistemas con filtros y sin filtros dependen del número de transferencias, y de la cantidad de materia manipulada. No obstante, una característica de este sector es que algunas secciones de preparación de mezclas son relativamente pequeñas y, debido a la naturaleza especializada y bajos volúmenes de

algunos de los productos, existe un alto nivel de manipulación y transferencia manual (y semimanual). Las emisiones de estas actividades dependen de la calidad del control de los sistemas. Evidentemente, cuando se manipulan materias primas que contienen compuestos con mayor potencial tóxico (Ej. óxido de plomo, arsénico, etc.), existe el potencial de emisión de estas sustancias.

3.7.2.2. Fusión

En el Sector de Vidrio Especial, el mayor potencial de emisiones medioambientales lo representan las emisiones a la atmósfera de las actividades de fusión. Las principales sustancias emitidas y sus fuentes asociadas se identifican en la Sección 3.2.2.1. La amplia gama y naturaleza especializada de los productos del Sector de Vidrio Especial lleva al uso de una gama más amplia de materias primas que en la mayoría de otros sectores. Por ejemplo, los embudos de tubos de rayos catódicos tienen un contenido de óxido de plomo de más del 20% (comparable al vidrio al plomo); ciertas composiciones de vidrio pueden comportar el uso de agentes de afino especializados como óxidos de arsénico y antimonio; y algunos vidrios ópticos pueden contener hasta un 35% de fluoruros y un 10% de óxido de arsénico. Las emisiones de fluoruros, plomo, arsénico y otros metales están directamente relacionadas con el uso de compuestos que contienen estas sustancias en la mezcla.

Debido a la naturaleza diversa del sector, pueden encontrarse la mayoría de las técnicas de fusión descritas en el Capítulo 2. No obstante, los bajos volúmenes de producción implican que la mayoría de hornos son bastante pequeños, y las técnicas más comunes son los hornos de recuperación, los hornos de oxi-gas, los hornos de fusión eléctricos y los hornos diarios. En algunos casos también se utilizan hornos regenerativos, por ejemplo en la producción de vidrio para pantallas de TV y vidrio soluble. Las temperaturas de fusión de los vidrios especiales pueden ser superiores a las de las composiciones más convencionales de producción en masa. Las pantallas de TV, el vidrio de borosilicato y la vitrocerámica, en particular, requieren temperaturas de fusión de más de 1.650 °C.

Estas altas temperaturas y formulaciones complejas pueden producir mayores emisiones por tonelada que, por ejemplo, los productos de vidrio sodocálcico. Las altas temperaturas favorecen altas velocidades de volatilización y formación de NO_x, y el mayor uso de agentes de afino con nitratos puede producir mayores emisiones de NO_x, SO₂ y metales. La menor escala de producción unida a las altas temperaturas significa asimismo que la eficiencia energética es generalmente menor.

La fusión de vidrio soluble es generalmente más convencional que en otros procesos de vidrio especial. Las materias primas son básicamente arena y carbonato sódico, y las emisiones se limitan generalmente a NO_x, SO₂, CO₂ y polvo. Hay un grado de superposición entre el vidrio especial y algunos otros sectores de la Industria del Vidrio, particularmente vidrio doméstico para algunos productos de borosilicato y vitrocerámicos. Las emisiones de estos hornos serán también comparables a las de los que producen vidrio doméstico.

Los niveles de emisiones para un horno particular pueden depender de muchos factores, pero principalmente la composición de la mezcla, el tipo de horno, las técnicas de eliminación utilizadas, el funcionamiento del horno y su edad. En las tablas anteriores se indican los niveles de emisiones (kg/tonelada de producto) para tres procesos de ejemplo. En el Anexo 1 se incluyen ejemplos de emisiones, tanto en masa como en concentración.

3.7.2.3. Actividades de Acabado

Las emisiones de las actividades posteriores al horno son muy específicas y deben considerarse para cada centro de producción. No obstante, hay algunos aspectos generales.

El vidrio soluble se disuelve a alta temperatura y presión, dando una solución de silicato sódico. Esto no presenta un potencial importante de emisiones a la atmósfera, aunque hay un grado de manipulación y proceso de materiales que puede originar emisiones de polvo.

La producción de vidrio para TV comporta generalmente un elemento de esmerilado y pulido que puede producir emisiones de polvo (el vidrio de los embudos de los tubos de rayos catódicos contiene más de un 20% de PbO). Estas operaciones se realizan normalmente bajo líquido o tienen aspiración y filtración de aire. De este modo, los niveles de emisiones son generalmente muy bajos. Algunos procesos de vidrio especial utilizan asimismo eliminación de NOx (SCR, SNCR), lo que puede producir emisiones de amoniaco.

Varios tipos de productos pueden requerir distintos grados de corte, esmerilado y pulido; todos ellos tienen potencial de emisión de polvo, y es necesario evaluar cada uno de ellos por separado.

3.7.3. Emisiones al Agua

Al igual que en otros sectores de la industria, los principales usos del agua son refrigeración y limpieza, y las emisiones acuosas contienen las purgas del sistema de agua de refrigeración, aguas de limpieza y circulación de aguas superficiales. En general, las aguas de limpieza no presentan aspectos específicos que no sean comunes a cualquier instalación industrial, es decir, sólidos inertes y posiblemente aceite. Las purgas del sistema de refrigeración contienen sales disueltas y productos de tratamiento del agua. La calidad de las aguas superficiales dependerá del grado de separación de los desagües y de limpieza del centro de producción.

No obstante, la diversidad del sector hace imposible identificar todas las posibles emisiones, por lo que cada caso debe estudiarse específicamente. Hay que tener en cuenta las materias primas empleadas para cada producto y el proceso utilizado. Cualquier materia potencialmente nociva que se utilice en el centro de producción tiene el potencial de entrar en los caudales de aguas residuales, particularmente cuando se manipulan materias primas y se cortan o esmerilan productos. Por ejemplo, el esmerilado y pulido del vidrio de TV produce una corriente acuosa que contiene las materias primas de ayuda de esmerilado y pulido, así como vidrio fino que puede contener, por ejemplo, plomo. En general, los sólidos se eliminan y el líquido se recicla en la medida de lo posible, pero es inevitable un cierto nivel de evacuación y potencial de vertido. En las tablas anteriores se facilita información cuantitativa para tres procesos de ejemplo.

3.7.4. Otros Residuos

En general, la mayor parte de residuos de vidrio generados internamente (vidrio de desecho) se recicla de nuevo al horno, y los niveles de residuos son por lo general bastante bajos. Los residuos generales de embalaje y reparación de los hornos son comunes a otros sectores. Los residuos de los sistemas de control de polvo y del lavado seco se reciclan al horno cuando es factible. En los procesos que comportan esmerilado y corte, los lodos separados de los circuitos de agua deben desecharse si no pueden ser reciclados o reutilizados. En las tablas anteriores se facilita información cuantitativa para tres procesos de ejemplo.

3.7.5. Energía

Para un sector tan diverso, es difícil dar información general sobre consumo de energía. Las tablas de los tres procesos de ejemplo dan una indicación del consumo de energía para esos ejemplos, pero puede haber una amplia variación según la técnica de fusión, la formulación de la mezcla y la forma en que se diseña y opera la planta. El informe holandés sobre MTD para la Industria del Vidrio indica un rango 12 -15 GJ/tonelada de producto final [tm29 Infomil].

Los comentarios generales de la Sección 3.2.3 son aplicables a este sector, y la discusión de técnicas de eficiencia energética del Capítulo 4 proporciona mayor información. Las consideraciones específicas al vidrio especial son que las temperaturas de fusión de los vidrios especiales son generalmente más altas que para los vidrios de producción en masa, y que los hornos para vidrio especial son generalmente más pequeños que en otros sectores de la Industria del Vidrio. Estos dos factores tienen como consecuencia mayores emisiones de CO₂ y un mayor consumo específico de energía.

3.8. Lana Mineral

La información presentada en esta sección hace referencia a toda la gama de tamaños de plantas y operaciones, pero no incluye modos especiales como los de puesta en marcha o parada. Algunos de los valores de emisiones más bajos hacen referencia a la operación de una sola planta, que consigue estas cifras por motivos específicos de ese centro de producción, por lo que los resultados no son necesariamente indicativos de las MTD para ese sector.

La salida principal en cuanto a masa es el producto, que puede estar entre el 55% y el 85% de la entrada de material para procesos de lana de roca, y entre el 75% y el 85% para procesos de lana de vidrio. Un factor importante en estos valores es el reciclaje de residuos de proceso, que aumenta significativamente la eficacia de la utilización de las materias primas. Las pérdidas se producen a través de residuos sólidos, residuos acuosos y emisiones a la atmósfera.

3.8.1. Entradas al Proceso

La composición química de la lana mineral puede variar ampliamente, y en general se expresa en términos de los óxidos que contiene. Es difícil identificar una composición “típica” de la mezcla para alguno de los tipos principales de lana mineral, es decir, lana de vidrio, lana de roca o lana de escoria. Las materias primas básicas se seleccionan y mezclan para obtener las composiciones finales deseadas en el vidrio tras la fusión. El porcentaje de cada materia prima puede variar considerablemente cuando se utilizan cantidades sustanciales de materias recicladas.

Los rangos de composición característicos para lana de vidrio, lana de roca y lana de escoria se muestran en el Capítulo 2. La Tabla 3.22 siguiente muestra la gama de materias primas que pueden usarse para conseguir estas composiciones.

Lana de Vidrio	Arena de sílice, vidrio de desecho de proceso, vidrio recuperado externo, residuos de proceso, sienita nefelínica, carbonato sódico, carbonato potásico, piedra caliza, dolomita, sulfato sódico, bórax, colemanita.
Lana de Roca/Escoria	Basalto, piedra caliza, escoria de alto horno, arenas de sílice, sulfato sódico, residuos de proceso, ocasionalmente residuos de otros procesos, Ej. arena de fundición.
Materias primas aglomerantes	Resina de fenol-formaldehído (en solución), fenol, formaldehído y catalizador de resina (si la resina se produce in situ), amoniaco, urea, aceite mineral, silicona, silanos, agua.
Combustibles	Gas natural, electricidad, coque (lana de roca / escoria sólo), combustibles de refuerzo (fuel-oil ligero, propano, butano).
Agua	Suministro general y fuentes naturales locales (pozos, ríos, lagos, etc.)
Materias primas auxiliares	Materiales de embalaje como plásticos, papel, cartón, y madera. Lubricantes de maquinaria, principalmente aceites minerales. Gases de proceso, nitrógeno y oxígeno. Productos químicos para el tratamiento del agua de refrigeración y del agua residual.

Tabla 3.22: Materias primas utilizadas en el Sector de Lana Mineral

En la lana de vidrio, los principales óxidos son el dióxido de silicio, los óxidos de metales alcalinos (predominantemente sodio y potasio) y los óxidos de metales alcalinotérreos (principalmente calcio y magnesio). Las fuentes más significativas de dióxido de silicio son la arena y el vidrio de desecho, como el vidrio recuperado y los residuos fibrosos. Las fuentes más significativas de óxidos de metales alcalinos y alcalinotérreos son la carbonato sódico, la potasa, la piedra caliza, la dolomita, y en menor medida el vidrio reciclado.

En la lana de roca / escoria, los principales óxidos son el dióxido de silicio y los óxidos de metales

alcalinotérreos (principalmente calcio y magnesio). El dióxido de azufre procede principalmente del basalto, material reciclado en briquetas y escoria de alto horno. Los óxidos de metales alcalinotérreos se obtienen de la piedra caliza, dolomita y material reciclado en briquetas. Algunas lanas de roca y lanas de escoria tienen niveles significativos de óxido de aluminio que se deriva de escoria de alto horno, basalto y materiales reciclados. Algunas formulaciones bajas en alúmina se producen a partir de mezclas con niveles significativos de arena de fundición y casco de vidrio, y no sólo basalto y escoria.

La proporción de lana mineral y de aglomerante varía según la aplicación del producto. Normalmente, los productos de lana mineral contienen entre un 95 y un 98% en peso de fibra. Algunos productos muy raros tienen un máximo de un 20% de aglomerante con un 1% de aceite mineral y un 0,5% de ingredientes varios (Ej. silicona). Los productos de lana de roca / escoria contienen en general porcentajes más bajos de aglomerante en comparación con los productos de lana de vidrio para aplicaciones similares. Esto es debido a que las densidades de productos con características de aplicación similares son distintas según se trate de lana de vidrio o de lana de roca / escoria. La lana de roca puede tener una densidad de hasta dos veces la de la lana de vidrio para conseguir las mismas características de aislamiento térmico, particularmente para productos de baja densidad.

Al igual que en todos los procesos de la Industria del Vidrio, una cantidad considerable de las materias primas se emite en forma de gases en la fusión. Esto dependerá principalmente de la cantidad de material reciclado empleado, aunque para un proceso típico de lana mineral las pérdidas por ignición estarán generalmente alrededor del 10%. Pueden registrarse niveles más elevados si se utilizan altos niveles de materias primas carbonosas en la mezcla.

Las materias primas aglomerantes son normalmente productos químicos líquidos sintéticos, aunque en ocasiones se utilizan productos químicos sólidos en polvo. En general, las formulaciones de los aglomerantes se consideran confidenciales y no se revelan. La resina fenólica puede fabricarse *in situ* o adquirirse a un proveedor externo. Esto tendrá poco impacto sobre las emisiones del proceso de lana mineral en sí, aunque evidentemente hay aspectos de consumos y emisiones asociados con la fabricación de resinas. Estos aspectos no se incluyen en el ámbito de este documento, por lo que debe hacerse referencia al material orientativo correspondiente de la Industria Química.

El agua puede usarse en el proceso de producción para refrigeración, limpieza y dilución y dispersión de aglomerantes, aunque el grado y los métodos de uso dependerán de la técnica de fabricación. Los procesos básicos son consumidores netos de agua, con potencial de medición de vapor de agua y gotas en las zonas de moldeo y polimerización. Asimismo, el sistema de enfriamiento por inmersión del vidrio de desecho para los procesos de lana de vidrio produce la evaporación de agua. La mayoría de instalaciones utilizan un sistema de agua de proceso en circuito cerrado con un alto nivel de reciclaje. El agua se lleva al sistema de agua de proceso desde el suministro general o desde fuentes naturales. Las materias primas también aportan algo de agua, particularmente las materias primas aglomerantes. El consumo global de agua para la fabricación de lana mineral es de 3 a 10 m³/tonelada de producto para lana de vidrio; y de 0,8 a 10 m³/tonelada de producto para lana de roca.

3.8.2. Emisiones a la Atmósfera

[tm26 EURIMA]

En el Sector de la Lana Mineral, las emisiones a la atmósfera pueden dividirse en tres partes: manipulación de materias primas, emisiones de las actividades de fusión y emisiones de los procesos de acabado u operaciones en línea (Ej. fibrado y moldeo, polimerización y acabado de los productos). Una característica de las emisiones de los procesos de acabado es que es difícil cuantificar su olor. Los olores son emitidos principalmente por las operaciones de polimerización, y se cree que son causados por productos de descomposición de los aglomerantes. Esta sección proporciona información sobre las emisiones de los procesos en concentración y masa por unidad de producto producido, y la tabla siguiente indica los volúmenes de los caudales de residuos.

Actividad de Proceso	(x1000)	Volumen de Escape del Proceso
Manipulación de materias primas	Nm ³ /h	1 - 5
Horno	Eléctrico	Nm ³ /h
	Llama – fibra de vidrio	Nm ³ /h
	Combinación	Nm ³ /h
	Viento caliente	Nm ³ /h
	Arco eléctrico sumergido	Nm ³ /h
	Llama – fibra de roca	Nm ³ /h
Operaciones en línea	Fibrado y moldeo	Nm ³ /h
	Polimerización de productos	Nm ³ /h
	Enfriamiento de productos	Nm ³ /h
	Acabado de productos	Nm ³ /h
		100 - 400
		5 - 40
		10 - 40
		5 - 70

Tabla 3.23: Volúmenes de gases de escape de los procesos de lana mineral

3.8.2.1 Materias Primas

En la mayoría de procesos modernos de lana de vidrio, los silos y recipientes de mezcla están equipados con sistemas de filtrado que reducen las emisiones a menos de 5 mg/Nm³. Las masas emitidas por los sistemas con filtros y sin filtros dependerán evidentemente del número de transferencias y de la cantidad de material manipulado. Nótese que las mezclas de materias primas de lana de vidrio suelen ser secas y se transportan neumáticamente. Por consiguiente, el potencial de emisiones de polvo de la manipulación de materias primas puede ser mayor que en otros sectores.

Los procesos de lana de vidrio generalmente utilizan materias primas gruesas con diámetros de partícula >50mm. Las materias primas se almacenan en silos o almacenes abiertos y se manipulan mediante sistemas y transportadores manuales. Existe la posibilidad de polvo transportado por el viento durante el almacenaje y la manipulación, especialmente durante clima seco. Pueden utilizarse una serie de técnicas para controlar las emisiones de polvo, como cerrar los almacenes y transportadores, humedecer los montones, etc. El nivel de emisiones es difícil de cuantificar y dependerá en gran medida de la cantidad de material manipulado y de lo bien que se apliquen estas técnicas.

3.8.2.2. Fusión

[tm26 EURIMA]

Los hornos de lana de vidrio son predominantemente con combustión de aire-gas (habitualmente con refuerzo eléctrico), pero con una serie sustancial de hornos calentados eléctricamente y un número menor de hornos con combustión a oxi-gas. Los hornos de lana de roca son casi todos cubilotes con combustión de coque, con unos pocos ejemplos de hornos con combustión a gas o electricidad. Las sustancias emitidas y sus fuentes asociadas se detallan en la Sección 3.2.2.1. Cuando es relevante para las técnicas de control de contaminación, el mecanismo de formación de emisiones se discute con mayor detalle en el Capítulo 4.

Los cubilotes para lana de roca presentan importantes diferencias con respecto a los hornos de vidrio más convencionales, que pueden afectar las emisiones del proceso. Una de las más significativas es el hecho de que los cubilotes trabajan en condiciones fuertemente reductoras. Por consiguiente, las emisiones de NOx son relativamente bajas, parte del azufre liberado del combustible o de las materias primas se reduce a sulfuro de hidrógeno, y el nivel de monóxido de carbono es alto. La mayoría de procesos llevan instalado un sistema de postcombustión que oxida el sulfuro e hidrógeno a dióxido de azufre y el monóxido de carbono a dióxido de carbono. El coque y las materias primas pueden contener niveles de metales, cloruros y fluoruros más elevados que los de otros procesos de vidrio, dando lugar a mayores emisiones de estas sustancias.

Un factor de importancia creciente que afecta las emisiones del horno de fusión es la contribución de los materiales reciclados. Si se recicla aglomerante que contiene fibra al horno, debe tenerse en cuenta el componente orgánico. En los cubilotes esto no es un problema, pero en los hornos de vidrio puede ser

necesario agregar agentes oxidantes como nitrato potásico, que pueden tener el efecto de aumentar las emisiones de NOx.

En los procesos de lana de vidrio se suele utilizar cemento para el briquetado de los residuos del proceso, y cuando se funden las briquetas se producen las consiguientes emisiones de SO₂.

La Tabla 3.24 siguiente muestra el rango completo de emisiones de las plantas de lana mineral en la UE, con cifras de kg/tonelada de material fundido entre paréntesis. La Tabla 3.25 siguiente muestra el 80% medio estimado del rango, con cifras de kg/tonelada de material fundido entre paréntesis.

Sustancia mg/Nm ³ (kg/t. material fundido)	Fusión Eléctrica, Lana de Vidrio	Hornos de Llama, Lana de Vidrio	Fusión Combinada, Comb. fósiles/Electricidad	Cubilotes, Lana de Roca	Horno y Arco Eléctrico Sumergido, Lana de Roca	Hornos de Llama, Lana de Roca
Partículas	2 - 250 (0,004 - 1,0)	10 - 1.000 (0,02 - 4,0)	10 - 1.000 (0,02 - 4,0)	10 - 3.000 (0,03 - 9,0)	10 - 30 (0,01 - 0,03)	10 - 50 (0,02 - 0,1)
Óxidos de Azufre (como SO₂)		20 - 1.000 (0,05 - 4,0)	20 - 1.000 (0,05 - 4,0)	150 - 3.500 (0,4 - 10,0)	1.000 - 3.000 (1,0 - 3,0)	30 - 300 (0,06 - 0,6)
Óxidos de Nitrógeno (como NO₂)	15 - 500 (0,002 - 0,03)	100 - 1.500 (0,5 - 6,0) ⁽¹⁾	100 - 1.500 (0,5 - 6,0)	50 - 400 (0,14 - 1,1)	50 - 200 (0,05 - 0,2)	800 - 1.500 (1,6 - 3,0)
Fluoruros (HF)	0,5 - 5 (0,003 - 0,03)	0,5 - 5 (0,002 - 0,02)	0,5 - 5 (0,002 - 0,02)	1 - 30 (0,003 - 0,09)	1 - 5 (0,001 - 0,005)	0,5 - 5 (0,002 - 0,02)
Cloruros (HCl)	0,2 - 5 (0,001 - 0,03)	1 - 30 (0,004 - 0,08)	1 - 30 (0,004 - 0,08)	10 - 150 (0,03 - 0,4)	10 - 50 (0,01 - 0,05)	1 - 30 (0,002 - 0,02)
Sulfuro de Hidrógeno (H₂S)				1 - 500 (0,003 - 1,4)	0 - 5 (0 - 0,005)	
Monóxido de Carbono				10 - 100.000 (0,03 - 300)	30 - 100 (0,03 - 0,1)	
Dióxido de Carbono	30.000 - 150.000 (100 - 300)	150.000 - 190.000 (400 - 500)	150.000 - 190.000 (400 - 500)	130.000 - 260.000 (400 - 800)	20.000 - 200.000 (20 - 200)	150.000 - 200.000 (400 - 500)
Metales⁽²⁾				0,1 - 30 (0,0003 - 0,09)		

Tabla 3.24: Rango completo de emisiones de las actividades de fusión de la mineral

(1) Los niveles más bajos de NOx corresponde a un horno con combustión de oxi-gas.

(2) Los metales se emiten principalmente en forma de partículas.

Sustancia mg/Nm ³ (kg/t. material fundido)	Fusión Eléctrica, Lana de Vidrio	Hornos de Llama, Lana de Vidrio	Fusión Combinada Comb. fósiles/Electricidad	Cubilotes, Lana de Roca	Horno e Arco Eléctrico Sumergido, Lana de Roca	Hornos de Llama, Lana de Roca
Partículas	25 - 220 (0,08 - 0,9)	30 - 200 (0,06 - 0,8)	30 - 200 (0,06 - 0,8)	20 - 100 (0,06 - 0,3)	10 - 30 (0,01 - 0,03)	10 - 50 (0,02 - 0,1)
Óxidos de Azufre (como SO₂)		20 - 100 (0,05 - 0,4)	20 - 100 (0,05 - 0,4)	400 - 2.500 (1,1 - 7,1)	1.000 - 3.000 (1,0 - 3,0)	30 - 250 (0,06 - 0,5)
Óxidos de Nitrógeno (como NO₂)	200 - 400 (0,02 - 0,025)	500 - 1.200 (2,5 - 4,8)	500 - 1.200 (2,5 - 4,8)	80 - 250 (0,25 - 0,7)	50 - 200 (0,05 - 0,2)	1.150 - 1.250 (2,3 - 2,5)
Fluoruros (HF)	0,5 - 1,0 (0,003 - 0,006)	1,0 - 5,0 (0,004 - 0,02)	1,0 - 5,0 (0,004 - 0,02)	1,0 - 15,0 (0,003 - 0,03)	1,0 - 5,0 (0,001 - 0,005)	1,0 - 5,0 (0,004 - 0,02)
Cloruros (HCl)	0,5 - 1,0 (0,003 - 0,006)	1,0 - 15,0 (0,004 - 0,04)	1,0 - 15,0 (0,004 - 0,04)	10 - 50 (0,03 - 0,2)	10 - 50 (0,01 - 0,05)	1,0 - 25 (0,002 - 0,015)
Sulfuro de Hidrógeno (H₂S)				1,0 - 200 (0,003 - 0,6)	0 - 5,0 (0 - 0,005)	
Monóxido de Carbono				30 - 80.000 (0,1 - 250)	30 - 100 (0,03 - 0,1)	
Dióxido de Carbono	30.000 - 150.000 (100 - 300)	150.000 - 190.000 (400 - 500)	(400 - 500)	130.000 - 260.000 (400 - 800)	20.000 - 200.000 (20 - 200)	150.000 - 200.000 (400 - 500)
Metales				0,1 - 2,0 (0,0003 - 0,006)		

Tabla 3.25: 80 % medio de las emisiones de fusión de lana mineral

3.8.2.3. Emisiones de Otras Actividades

[tm26 EURIMA]

Como se discute en el Capítulo 2, los productos de lana mineral suelen contener un porcentaje de aglomerante a base de resina fenólica. La solución aglomerante se aplica a las fibras en la zona de moldeo y se liga y seca en el horno de polimerización. El gas residual de la zona de moldeo contiene partículas, fenol, formaldehído y amoniaco.

Las partículas se componen de material tanto orgánico como inorgánico, a menudo con un tamaño de partícula muy pequeño. También pueden detectarse niveles bajos de COV y aminas si los contiene el sistema aglomerante. Debido a la naturaleza del proceso, la corriente de gas tiene un gran volumen y un alto contenido de humedad. Las emisiones del horno consisten en compuestos volátiles del aglomerante, productos de descomposición del aglomerante, vapor de agua y productos de combustión de los quemadores del horno.

Tras salir del horno, el producto se enfriá pasando una gran cantidad de aire a través del mismo. Este gas puede contener fibra de lana mineral y niveles bajos de material orgánico. El acabado del producto comporta su corte, manipulación y embalaje, lo que puede dar lugar a emisiones de polvo.

Un factor importante que tiene un importante impacto en las emisiones del moldeo, polimerización y enfriamiento es el nivel de aglomerante aplicado al producto, ya que los productos con mayor contenido de aglomerante producen generalmente mayores niveles de emisiones. Las emisiones derivadas del aglomerante dependen esencialmente de la cantidad de aglomerante aplicado a lo largo de un determinado tiempo, y por consiguiente de un alto contenido de aglomerante, y en menor medida los productos de alta densidad pueden producir mayores emisiones.

La Tabla 3.26 siguiente presenta la gama completa de emisiones de las operaciones de acabado de las plantas de lana mineral de la UE, con cifras de kg/tonelada de producto entre paréntesis. La Tabla 3.27 muestra el 80% medio estimado del rango.

Sustancia mg/Nm ³ (kg/tonelada de producto)	Combinación de fibrado, moldeo y polimerización	Fibrado y moldeo	Polimerización del producto	Enfriamiento del producto	Acabado del producto
Partículas	10 - 200 (0,3 - 6,0)	10 - 200 (0,3 - 6,0)	5,0 - 55 (0,01 - 0,18)	10 - 50 (0,04 - 0,3)	1,0 - 50 (0,005 - 0,4)
Fenol	2,0 - 50 (0,05 - 1,6)	2,0 - 50 (0,05 - 1,5)	2,0 - 40 (0,004 - 0,11)	1,0 - 10 (0,004 - 0,06)	.
Formaldehido	2,0 - 30 (0,05 - 1,2)	2,0 - 30 (0,05 - 1,0)	2,0 - 60 (0,004 - 0,17)	1,0 - 10 (0,004 - 0,06)	.
Amoniaco	20 - 250 (0,6 - 8,8)	20 - 250 (0,5 - 7,6)	30 - 460 (0,06 - 1,9)	1,0 - 50 (0,004 - 0,3)	.
Óxidos de Nitrógeno (NO _x)			50 - 200 (0,1 - 0,6)		.
Compuestos Orgánicos Volátiles (COV)	5,0 - 150 (0,1 - 5,0)	5,0 - 150 (0,1 - 4,6)	5,0 - 150 (0,01 - 0,43)	1,0 - 30 (0,004 - 0,2)	.
Dióxido de Carbono	(40 - 230)		20.000 - 80.000 (40 - 230)		.
Aminas	1,0 - 40 (0,1 - 1,3)	5,0 - 40 (0,1 - 1,2)	5,0 - 20 (0,01 - 0,06)	1,0 - 5,0 (0,004 - 0,03)	.

Tabla 3.26: Rango completo de emisiones de las líneas de lana mineral en mg/Nm³

Sustancia mg/Nm ³ (kg/tonelada de producto)	Combinación de fibrado, moldeo y polimerización	Fibrado y moldeo	Polimerización del producto	Enfriamiento del producto	Acabado del producto
Partículas	10 - 50 (0,9 - 1,9)	10 - 50 (0,6 - 3,5)	5,0 - 25 (0,01 - 0,07)	10 - 30 (0,04 - 0,2)	5,0 - 20 (0,03 - 0,16)
Fenol	5,0 - 25 (0,2 - 1,3)	5,0 - 25 (0,1 - 0,8)	5,0 - 15 (0,01 - 0,04)	1,0 - 5,0 (0,004 - 0,03)	
Formaldehido	5,0 - 20 (0,15 - 0,43)	5,0 - 20 (0,1 - 0,6)	5,0 - 30 (0,01 - 0,09)	1,0 - 5,0 (0,004 - 0,03)	
Amoníaco	40 - 150 (1,8 - 5,4)	40 - 150 (1,0 - 4,5)	50 - 200 (0,1 - 0,6)	2,0 - 20 (0,007 - 0,12)	
Oxídos de Nitrógeno (NO _x)			50 - 150 (0,1 - 0,4)		
Compuestos Orgánicos Volátiles (COV)	10 - 80 (0,2 - 2,7)	10 - 80 (0,3 - 2,4)	10 - 80 (0,02 - 0,23)	1,0 - 10 (0,004 - 0,06)	
Dióxido de Carbono	(40 - 230)		20.000 - 6.0000 (40 - 170)		
Aminas	5,0 - 20 (0,1 - 1,0)	5,0 - 20 (0,1 - 0,6)	5,0 - 10 (0,01 - 0,03)	1,0 - 5,0 (0,004 - 0,03)	

Tabla 3.27: Rango medio (80 %) de las emisiones de las líneas de lana mineral

3.8.3. Emisiones al agua

En funcionamiento normal, los procesos son consumidores netos de agua y las emisiones acuosas son muy bajas. La mayoría de procesos utilizan un sistema de agua de proceso de circuito cerrado, y cuando es factible las aguas de purga del sistema de refrigeración y las aguas de limpieza se alimentan a dicho sistema. Si son incompatibles o si los volúmenes son demasiado grandes, puede que haya que evacuarlas por separado, pero muchas plantas disponen de un tanque de retención para acomodar las sobrecargas de volumen, que luego pueden ser devueltas al sistema. En algunas plantas, el agua de refrigeración caliente y limpio se evaca al alcantarillado o a un curso natural de agua. Pueden producirse pequeñas cantidades de agua residual contaminada de compuestos químicos, vertidos, interceptadores de aceite, etc., que normalmente se evacuan al sistema de agua de proceso, se transportan para su tratamiento externo o se evacuan al sistema de alcantarillado.

El gran volumen del sistema de agua de proceso produce un potencial de contaminación de los circuitos de agua limpia, como el agua superficial y el agua de enfriamiento del vidrio de desecho. Si los sistemas están mal diseñados o incorrectamente controlados, pueden producirse emisiones más graves. Si se utilizan técnicas de lavado húmedo, particularmente lavado químico, el efluente puede no ser compatible con el sistema de agua de proceso, dando lugar a otra corriente de residuos.

3.8.4. Otros Residuos

[tm26 EURIMA]

Las principales fuentes de residuos sólidos son:

- a) Vertidos de la manipulación de materias primas de la mezcla.
- b) Vidrio de desecho de proceso enfriando el material fundido caliente en agua durante el by-pass de la máquina de fibrado en la producción de lana de vidrio.
- c) Material fundido sin fibrar de los procesos de lana de roca durante el by-pass de la máquina de fibrado.
- d) Polvo recogido de los sistemas de eliminación, principalmente precipitadores electrostáticos y filtros de mangas.
- e) Granalla del fibrado de lana de roca. Se trata de un material pesado no fibroso y semifibrado que es demasiado pesado para llegar a la correa de recogida, y se recoge bajo la máquina de fibrado. Alrededor de un 10-20% del material fundido que llega a la máquina de fibrado forma granalla.
- f) Recortes de bordes de producto.

- g) Residuos de lana creados durante los cambios de producto, paradas de las líneas o productos no conformes a las especificaciones.
- h) Residuos de los filtros de lana de roca, que tienen un elevado contenido orgánico, frecuentemente alrededor del 50%.
- i) Hierro y material fundido de los sangrados de los cubilotes de lana de roca.
- j) Material fundido mezclado con roca de las paradas del cubilote.
- k) Residuos sólidos del filtrado de los circuitos de agua de proceso. Representan un 0,5 – 2,0 % de la producción del proceso, y están compuestos de fibra, sólidos aglomerantes y hasta un 50% de humedad.
- l) Residuos de embalaje y otros residuos generales.
- m) Residuos de material refractario de la reconstrucción de hornos.

En la producción de lana de vidrio, es común reciclar directamente al horno los vertidos de mezclas, la lana de vidrio de desecho y el polvo recogido por los sistemas de eliminación. En los procesos de lana de vidrio, la granalla, el material fundido de by-pases y el polvo de los sistemas de aspiración se reciclan normalmente si se dispone de un proceso de briquetado. No obstante, los recortes de bordes se trituran normalmente y se reciclan a la zona de moldeo, y en algunos casos el producto de desecho seco puede triturarse para producir un producto de lana de soplado.

Los residuos de paradas de los cubilotes y de sangrado pueden reciclarse en teoría a través de un sistema de briquetado, pero no suele ser frecuente, dado que son inertes y pueden usarse como material de relleno (Ej. relleno de carreteras). También es posible separar el hierro metálico de los residuos y venderlo como chatarra, pero el incentivo económico es bajo.

Actualmente no se dispone de una estimación del porcentaje de residuos reciclados en el sector de lana mineral. No obstante, la Tabla 3.28 siguiente da una indicación de la práctica habitual en el momento presente.

	Lana de Vidrio	Lana de Roca y de Escoria
Residuos totales generados en porcentaje del producto.	5 - 25 %	20 - 60 %
Porcentaje de los residuos totales reciclados.	10 - 100 %	0 - 100 %
Porcentaje de los residuos totales desecharos externamente.	0 - 90 %	0 - 100 %

Tabla 3.28: Generación y desecho de residuos sólidos en el Sector de Lana Mineral

3.8.5. Energía

[tm26 EURIMA, tm14 ETSU]

Las fuentes de energía predominantes para la fusión de lana de vidrio son el gas natural y la electricidad. La lana de vidrio se produce principalmente en cubilotes con combustión de coque, y existen algunos ejemplos de hornos con combustión a gas y con combustión eléctrica. El gas natural se utiliza asimismo en cantidades sustanciales para fibrado y polimerización. La electricidad se utiliza para los servicios generales, y el fuel-oil ligero, el propano y el butano se emplean en ocasiones como combustibles de refuerzo. En este sector hay una serie de hornos con combustión de oxi-gas.

Las tres principales áreas de consumo de energía son la fusión, el fibrado y la polimerización. La distribución puede variar enormemente de un proceso a otro y es muy sensible comercialmente. La Tabla 3.29 muestra el consumo total de energía en la producción de lana mineral, con un desglose en las principales áreas de proceso. Las cifras de fibrado, polimerización y otros consumos son estimaciones realizadas por el EIPPCB, basadas en conversaciones con la industria y cifras de [tm14 ETSU].

	Lana de Vidrio	Lana de Roca y de Escoria
Consumo total de energía, GJ/tonelada de producto acabado	11 – 22	7 – 18
Fusión, % de la energía total	20 – 45 %	30 – 70 %
Fibrado, % de la energía total	25 – 35 %	25 – 35 %
Polimerización y secado, % de la energía total	25 – 35 %	25 – 35 %
Otros, % de la energía total	6 – 10 %	6 – 10 %

Tabla 3.29: Consumo energético en la producción de lana mineral

El consumo energético directo para la fusión eléctrica es del orden de 3,0 a 5,5 GJ/tonelada de producto acabado. El consumo energético para la fusión eléctrica es de aproximadamente un tercio del requerido para una fusión 100% aire-gas, lo que permite estimar el consumo relativo de energía de cada etapa de proceso. Con estas cifras, el error inherente de dicha estimación es muy alto, pero dan una indicación del consumo de energía.

3.9. Fibra Cerámica

[tm8 S23.03, tm40 ECFIA]

La salida principal es el producto. El rendimiento de las materias primas a material fundido es superior al 90%, y el rendimiento de material fundido a producto acabado (plancha/bruto) está entre el 55% y el 85%. No obstante, es importante resaltar que el rendimiento de material fundido a producto acabado es una estimación y puede variar según el tipo, la naturaleza, el volumen y la duración de la producción. En particular, el nivel más bajo corresponde a producciones específicas y técnicamente más difíciles.

3.9.1. Entradas al Proceso

Existen dos formulaciones principales de productos, silicato de alúmina de alta pureza y silicato de alúmina y zirconio, cuyas composiciones de detallan en el Capítulo 2. Las principales materias primas se indican en la tabla siguiente, son una combinación de sustancias naturales (normalmente procesadas) y sintéticas.

Materias primas para fusión	Óxidos de aluminio, calcio, magnesio, silicio y zirconio. También pequeños niveles de óxidos de potasio, sodio, titanio, hierro y cromo.
Proceso secundario	Para moldeo al vacío se utiliza una mezcla coloidal húmeda de almidón, látex, sílice o arcilla. Otras actividades pueden emplear sustancias similares y en ocasiones rellenos y resinas o polímeros orgánicos.
Combustibles	Electricidad, gas natural, en ocasiones fuel-oil ligero (refuerzo, calefacción).
Agua	Suministro general y fuentes naturales locales (pozos, ríos, lagos, etc.).
Materias primas auxiliares	Materiales de embalaje como plásticos, papel, cartón y madera. Aceites minerales (recubrimiento de las fibras y otros usos generales). Productos químicos para el tratamiento del agua de refrigeración y del agua residual.

Tabla 3.30: Materias primas utilizadas en el Sector de Fibra Cerámica

Las materias primas para la fusión se mezclan para obtener las composiciones requeridas en la fusión. En general, más del 90% de la composición se deriva de los óxidos de silicio, aluminio y zirconio. El dióxido de silicio se deriva principalmente de arena de sílice de alta calidad, y de óxido de aluminio (alúmina) que puede encontrarse en la naturaleza, aunque normalmente se deriva del proceso con bauxita. El dióxido de zirconio se encuentra en la naturaleza en forma de badeleyita, o puede ser sintético.

Los residuos se reciclan a ser posible directamente al horno en forma de polvo, o en ocasiones en los productos en forma de fibra. El proceso secundario puede ser muy específico; las sustancias indicadas en la tabla de moldeo al vacío son frecuentes, pero hay otras que pueden variar ampliamente.

Los principales usos del agua en el sector de Fibra Cerámica son para circuitos de refrigeración y limpieza. El agua de refrigeración se utiliza, normalmente en circuitos cerrados, para refrigerar diversos equipos, con las correspondientes pérdidas por evaporación y purgas. El agua también se utiliza en las operaciones de moldeo al vacío y para planchas y papeles. El consumo real de agua y las emisiones de vapor de agua pueden variar según las condiciones locales (Ej. temperatura ambiente y dureza del suministro de agua).

La fuente de energía para la fusión es exclusivamente la electricidad, aunque con frecuencia se utiliza gas natural para actividades de acabado, en particular para el secado.

3.9.2. Emisiones a la Atmósfera

3.9.2.1. Materias Primas

En la mayoría de procesos de fibra cerámica, los silos y recipientes de mezcla están equipados con sistemas de filtros que reducen las emisiones de polvo a menos de 5 mg/Nm³. Las masas emitidas de los sistemas con filtros y sin filtros dependerán del número de transferencias, y de la cantidad de material manipulado.

3.9.2.2. Fusión

Las emisiones de la fusión son por lo general muy bajas y consisten principalmente en polvo y materias primas. Las materias primas son normalmente muy puras y consisten casi exclusivamente en óxidos; por consiguiente, hay muy poco desgasado y no hay emisiones significativas de compuestos gaseosos. La mayoría de hornos están provistos de un sistema de aspiración que ventila a través de un filtro de mangas. Las emisiones de polvo están generalmente por debajo de 20 mg/Nm³.

3.9.2.3. Actividades de Acabado

Las emisiones de polvo y fibras puede ser generadas por una serie de áreas dentro del proceso, como: fibrado y recogida, afelpado con agujas, combustión de lubricantes, hendidura, recorte, corte, embalaje y áreas de proceso secundario. Todas las zonas en las que pueden generarse emisiones de partículas o de fibras están normalmente provistas de un sistema de aspiración eficaz que ventila a un sistema de filtro de tejido. Las emisiones de polvo están generalmente por debajo de 20 mg/Nm³, y las emisiones de fibras están en el rango 1 - 5 mg/Nm³. También pueden producirse niveles bajos de emisiones orgánicas de algunas actividades de proceso secundario, normalmente inferiores a 50 mg/Nm³.

3.9.3. Emisiones al Agua

Como se ha indicado anteriormente, los principales usos del agua en este sector son limpieza, refrigeración, y para moldeo al vacío y otros procesos secundarios. Las emisiones acuosas se reducen a las purgas del sistema de refrigeración, aguas de limpieza y circulación de aguas superficiales. Las aguas de limpieza no presentan aspectos particulares que no sean comunes a cualquier otra actividad industrial, es decir, sólidos inertes y aceite. Las purgas del sistema de refrigeración contienen sales disueltas y productos químicos de tratamiento de agua. La calidad del agua superficial dependerá del grado de separación de los desagües y de la limpieza del centro de producción. El agua utilizada para el moldeo al vacío se recicla con una purga, que puede contener niveles bajos de sustancias orgánicas. En este sector se utilizan técnicas de eliminación simples, como sedimentación, cribado, separadores de aceite y neutralización.

3.9.4. Otros Residuos

[tm40 ECFIA]

Los niveles de residuos son generalmente bajos. Cuando es posible, los residuos (mezcla, vidrio de desecho, recortes de bordes, etc.) se reciclan directamente al horno (requiere proceso para fibras) o en los productos. También se producen residuos en forma del material recogido en el equipo de eliminación de polvo. En general, este material no se recicla directamente al horno. La contaminación potencial y la incertidumbre acerca de la composición lo hacen difícil, pero hay algunas iniciativas en marcha para abordar el tema. Debido a la naturaleza del material, puede ser caro de desechar, lo que ayuda a proporcionar un incentivo para encontrar alternativas.

La mayoría de materias primas son suministradas en gran volumen y no generan residuos de material de embalaje. Los residuos de las operaciones de embalaje de los productos (plástico, cartón y madera, etc.) normalmente se reutilizan o se reciclan si es factible. Otros residuos no específicos de la industria se desechan por medios convencionales, o se reciclan cuando los programas locales o nacionales lo permiten. Al término de la campaña de un horno, la estructura refractaria es desmontada y sustituida. Cuando es factible, este material se recupera para su reutilización o venta.

El sector de Fibra Cerámica de la UE en su conjunto produce alrededor de 700 – 900 toneladas anuales de residuos que contienen fibras y 100 – 700 toneladas de otros residuos.

3.9.5. Energía

[tm40 ECFIA]

Hay poca información disponible sobre el consumo energético en este sector. La fusión es exclusivamente con calentamiento eléctrico con muy pocas pérdidas volátiles. Por consiguiente, la eficacia directa de la fusión (excluidos aspectos externos) es bastante alta, aunque la composición tiene un alto requisito energético para su fusión y los hornos son relativamente pequeños. El consumo energético es de 6,5 – 16,5 GJ/tonelada de material fundido. El consumo de energía para las otras actividades es de 3,5 – 9,5 GJ/tonelada de producto (basado en una conversión de las materias primas en producto final del 75 %).

3.10. Fritas

La principal salida es el producto, y el rendimiento de fusión de las materias primas es del 75 - 80 % según la formulación precisa. La mayoría de las pérdidas son debidas al CO₂ emitido durante la fusión. Los procesos no producen vidrio de desecho como tal, y el único material que se recicla generalmente es el polvo del equipo de eliminación, que no afecta de forma significativa el rendimiento. El rendimiento básico del producto desde el material fundido es muy alto, ya que el material simplemente se enfriá en agua, por lo que las únicas pérdidas son los sólidos que no pueden separarse del agua.

3.10.1. Entradas al proceso

[tm46 ANFFECC]

Las principales materias primas utilizadas para las formulaciones más comunes se indican en la tabla siguiente, junto con una composición indicativa de la mezcla. Las figuras precisas varían, pero los valores de la tabla son indicativos en un amplio sentido.

Tipo de Frita	Materias Primas	% aproximado en la mezcla
Fritas Cerámicas / de Vidrio	Compuestos de zirconio Feldespato Cuarzo Ácido bórico Oxido de zinc Dolomita Carbonato cálcico Nitrato potásico	7,7 26,8 25,9 6,8 8,4 8,4 13,4 2,6
Fritas de Esmalte	Bórax Cuarzo Nitrato sódico Fluorosilicato sódico Fluorosilicato potásico Fosfato sódico Oxido de titanio	19,1 42 7,8 1,2 7,8 3,2 18,9
Fritas de bajo punto de fusión	Plomo rojo Pb_3O_4 Cuarzo Oxido de zinc Ácido bórico	50 19,8 15,1 15,1

Tabla 3.31: Principales materias primas utilizadas en la producción de fritas

El agua se emplea para refrigeración y limpieza, pero también para enfriar y fragmentar el vidrio fundido (enfriamiento con agua) y para molienda húmeda. Todos los circuitos de agua son normalmente circuitos cerrados con las correspondientes pérdidas por evaporación y purgas. Otras pérdidas de agua son el contenido de agua del producto y el contenido de agua de los sólidos recogidos del circuito de enfriamiento con agua. El consumo de agua se estima en 0,5 – 1,5 m³/tonelada de frita.

El principal combustible utilizado es el gas natural, también se utiliza fuel-oil en algunas instalaciones, aunque de forma mucho menos común (<10%) Muchas instalaciones son con combustión a oxi-gas y por lo tanto consumen una cantidad relativamente grande de oxígeno.

3.10.2. Emisiones a la Atmósfera

3.10.2.1. Materias primas

En la mayoría de procesos modernos de vidrio para envases, los silos y recipientes de mezcla están equipados con sistemas de filtro que reduce las emisiones de polvo a menos de 5 mg/Nm³. Las masas emitidas de los sistemas con filtros y sin filtros dependerán del número de transferencias, y de la cantidad de material manipulado. Aunque es bastante raro y sólo en niveles bajos, algunos procesos de fritas comparten el uso de materias primas que contienen plomo u otros metales pesados. Cuando se manipulan materias primas que contienen compuestos potencialmente tóxicos, existe el potencial de emisión de estas sustancias. Casi invariablemente se aplican medidas eficaces para minimizar las emisiones de estas sustancias.

3.10.2.2. Fusión

En el Sector de Fritas, el mayor potencial de emisiones medioambientales son las emisiones a la atmósfera de las actividades de fusión. Las sustancias emitidas y las fuentes asociadas se indican en la Sección 3.2.2.1. Todos los hornos de este sector son con combustión de combustibles fósiles (principalmente gas natural y algo de fuel-oil). La tabla siguiente presenta el rango de emisiones de este sector, no se dispone de un desglose estadístico.

Sustancia	Concentración mg/Nm ³	Emisiones kg/t. material fundido
Polvo	5 - 850	0,1 – 9,0
Oxidos de Nitrógeno (como NO ₂)	290 – 2.000	0,4 – 16,0
Oxidos de azufre (como SO ₂)	<50 – 4.000	0,4 – 32,0
Cloruros (HCl)	0,1 - 20	<0,01 – 0,16
Fluoruros (HF)	0,1 - 100	<0,01 – 0,8
Metales	<1 - 25	<0,01 – 0,2

Tabla 3.32: Niveles de emisiones de los hornos de fritas

Las emisiones de polvo dependerán de si hay instalado un sistema de eliminación, la mayoría de plantas disponen de filtros de mangas. Las emisiones de óxidos de nitrógeno dependen principalmente del sistema de combustión, muchos hornos son con combustión a oxi-gas, que son los que representan las emisiones más bajas de emisiones arriba indicadas. La mayoría de hornos son con combustión a gas y las emisiones de óxidos de azufre son inferiores a 200 mg/Nm³ según el sulfato de la mezcla.

3.10.2.3. Actividades de Acabado

Las emisiones a la atmósfera de los procesos de acabado son muy bajas. La gran mayoría de la molturación se realiza en mojado, aunque la molturación en seco puede originar emisiones de polvo si no se dispone de un sistema de eliminación.

3.10.3. Emisiones al Agua

Las emisiones al agua consisten en las emisiones normales de refrigeración, limpieza y circulación superficial. Los circuitos de enfriamiento y molturación son normalmente cerrados con relleno de agua fresca, pero en ocasiones se realiza una purga para evitar la acumulación de sales. Los niveles de emisiones son muy bajos pero pueden contener sólidos en suspensión, y en ocasiones puede haber metales pesados presentes en los sólidos en suspensión. Los metales están normalmente fijados en el vidrio y pueden eliminarse mediante técnicas de separación de sólidos.

3.10.4. Otros Residuos

Los niveles de residuos son por lo general muy bajos. El principal residuo de proceso es el material sólido (principalmente frita) separado de los circuitos de agua. Este material no se recicla normalmente ya que su composición es demasiado variable. En la mayoría de plantas, el porcentaje de residuos en relación al producto bueno es del orden del 0,5 - 3 %.

La mayoría de materias primas minerales son suministradas en gran volumen y no generan residuos de material de embalaje. Los residuos de las operaciones de embalaje de los productos (plástico, cartón y madera, etc.) normalmente se reutilizan o se reciclan si es factible. Otros residuos no específicos de la industria se desechan por medios convencionales, o se reciclan cuando los programas locales o nacionales lo permiten. Al término de la campaña de un horno, la estructura refractaria es desmontada y sustituida. Cuando es factible, este material se recupera para su reutilización o venta.

3.10.5. Energía

Existe muy poca información disponible sobre el consumo energético en este sector. Los hornos son predominantemente (>90%) con combustión a gas, aunque hay algunos hornos de fuel-oil y otros con combustión doble. No hay ejemplos conocidos de fusión eléctrica a escala comercial. Los hornos tienden a ser muy pequeños en comparación con la mayoría de hornos de la Industria del Vidrio, y hay pocos hornos de más de 20 toneladas al día, y muchos hornos son hornos discontinuos de pequeño tamaño. Normalmente hay varios hornos pequeños en una misma instalación, y cada uno de ellos produce formulaciones distintas. No obstante, los requisitos de afinado son generalmente menores, por lo que el consumo global de energía por tonelada de material fundido es comparable a otros sectores, aproximadamente 13 GJ/tonelada. El consumo energético para actividades no relacionadas con la fusión es muy bajo, debido al bajo nivel de proceso ulterior, y los productos no se suelen secar.

Muchos hornos del norte de Europa son con combustión a oxi-gas, lo que puede producir un ahorro sustancial de energía. En varios casos se han reportado reducciones en el consumo de gas superiores al 50%.

CAPÍTULO 4. TÉCNICAS A CONSIDERAR EN LA DETERMINACIÓN DE LAS MTD

4.1. Introducción

Este capítulo presenta las técnicas de reducción de emisiones que se consideran más apropiadas en la determinación de lo que constituyen las mejores técnicas disponibles, tanto en general como para una determinada instalación. La Industria del Vidrio incluye una amplia variedad de productos, procesos y técnicas de fabricación, por lo que puede usarse una amplia gama de técnicas de eliminación. No obstante, la idoneidad y eficacia de las técnicas pueden variar significativamente entre aplicaciones.

Este capítulo tiene siete secciones principales, que cubren:

- Selección de la técnica de fusión.
- Manipulación de materias primas.
- Técnicas para controlar las emisiones a la atmósfera de las actividades de fusión.
- Técnicas para controlar las emisiones a la atmósfera de las otras actividades.
- Técnicas para controlar las emisiones al agua.
- Técnicas para minimizar otros residuos.
- Energía.

El principal impacto medioambiental de la Industria del Vidrio en su conjunto proviene de las emisiones a la atmósfera de las actividades de fusión. Las técnicas para la reducción de estas emisiones se describen en la Sección 4.4, que es la sección más amplia y detallada de este capítulo. La mayoría de las técnicas descritas son relevantes a la mayoría de instalaciones de la Industria del Vidrio y comparten una base común. Por este motivo, la Sección 4.4 está estructurada con un enfoque basado en las sustancias, describiéndose para cada sustancia las diversas técnicas de reducción de emisiones. Las técnicas han sido descritas en la sección relativa a la sustancia sobre la que tienen el mayor efecto, pero inevitablemente muchas de las técnicas tienen efectos sobre varias sustancias. Cuando procede, se han descrito los efectos sobre otras sustancias, con referencias cruzadas a otras secciones.

En diversas partes del documento se utilizan los términos de medidas de eliminación primarias y secundarias. Estos términos son más bien imprecisos pero ayudan a clasificar algunas de las técnicas. En general, las técnicas primarias son las que reducen o evitan la formación de los contaminantes; y las técnicas secundarias son las que actúan sobre los contaminantes para hacerlos menos nocivos (Ej. convirtiéndolos a otras especies) o los recogen en una forma que permite su reutilización, reciclaje o desecho. Algunas de las técnicas descritas no son fácilmente clasificables en ninguna de ambas categorías, y en dicho caso se detalla en el texto.

Cuando es factible, la información sobre las técnicas se facilita de forma consistente, agrupada en cinco epígrafes generales. No obstante, para algunas de las técnicas (especialmente algunas de las técnicas primarias) este enfoque no es la forma más lógica o eficaz de presentar la información, y cuando procede las secciones se han estructurado de forma distinta. Los cinco epígrafes generales son:

- Descripción de la técnica: Discusión de los principios de la técnica y su aplicación en la Industria del Vidrio.
- Eficacia medioambiental: Descripción de los niveles de emisiones alcanzados.
- Consideraciones económicas: Contiene información sobre costes (inversión, explotación e infraestructuras) si se halla disponible.

- ❑ Aplicabilidad: Cubre los aspectos relativos a distintas aplicaciones.
- ❑ Consideraciones asociadas: Incluye los efectos sobre otros medios y dentro de un medio, así como los efectos sobre otros aspectos además de los niveles de emisiones y los costes (Ej. consumo energético, flexibilidad de los procesos, calidad de los productos, vida útil de los hornos, emisiones externas y acumulación de impurezas dentro del ciclo de proceso).

Una consideración importante para este capítulo es que una técnica que tiene éxito en una aplicación puede tener implicaciones muy distintas si se utiliza en otro sector o incluso en otra instalación del mismo sector. Los costes, eficacia medioambiental y ventajas y desventajas asociadas pueden variar ampliamente para los distintos sectores y para cada instalación. Para cada técnica se discute su disponibilidad y su posible aplicabilidad en diversas situaciones.

Para poder evaluar la aplicabilidad de cualquier técnica descrita en este capítulo a un proceso de fusión continuo, es necesario considerar si puede aplicarse al horno durante la campaña, o si sólo puede aplicarse (o es mejor que se aplique) en una reconstrucción. Una característica importante de la Industria del Vidrio es el hecho de que los hornos tienen una vida operativa limitada, y al cabo de un periodo deben ser reparados o reconstruidos en distintos grados. En general, los hornos que utilizan combustibles fósiles que producen vidrio para envases, vidrio plano, lana de vidrio, fibra de vidrio de filamentos continuos y vidrio soluble funcionan continuamente por espacio de 8 a 12 años. Los hornos con combustibles fósiles para vidrio especial y vidrio doméstico funcionan normalmente de forma continua de 3 a 8 años. Los hornos con calentamiento eléctrico tienden a tener vidas operativas más cortas en todas las aplicaciones, entre 2 y 7 años. Otros hornos, como los cubilotes y los hornos de fusión discontinuos se utilizan durante períodos mucho más cortos, que van desde unos pocos días hasta varias semanas.

Existen dos categorías principales de reconstrucción para un proceso continuo:

- En una reconstrucción “normal”, el material refractario del horno y, si procede, los regeneradores, se reparan mediante la sustitución total o parcial del material. La carcasa del horno no se ajusta significativamente, y las dimensiones del horno permanecen básicamente sin cambios. No hay cambios significativos en las características o tecnología de los hornos, y este es el tipo más habitual de reconstrucción entre campañas.
- Una reconstrucción “completa” supone un ajuste importante o la sustitución de la carcasa del horno además de la sustitución del material refractario. Esto puede compararse a la construcción de un horno nuevo, aunque en muchos casos puede conservarse gran parte de la infraestructura existente y en particular los regeneradores. Este tipo de reconstrucción es menos frecuente y normalmente se realiza cuando se requiere un cambio importante en las características del horno (Ej. una área de fusión considerablemente mayor o cambios importantes en la capacidad de combustión) o en su tecnología. Una reconstrucción completa normalmente representa un coste considerablemente mayor que una reconstrucción normal.

Durante una campaña de un horno, la posibilidad de modificar el horno es limitada. No obstante, a menudo se realizan reparaciones en caliente para sustituir o apuntalar los refractarios dañados, y las modificaciones o sustituciones de los quemadores también pueden ser relativamente simples. Los principales cambios que afectan a la tecnología de fusión se realizan normalmente de forma más económica si se hacen coincidir con reconstrucciones del horno. Esto puede también ser verdad para medidas complejas de eliminación secundaria. No obstante, durante la campaña de producción es posible realizar muchas mejoras en el funcionamiento del horno, incluida la instalación de técnicas secundarias. Cuando procede, estos aspectos se discuten en la consideración de la aplicabilidad de las distintas técnicas.

La distinción entre reconstrucción “normal” y “completa” no es absoluta y hay una serie de grados entre la reconstrucción normal más simple y la demolición completa y sustitución total de un horno. Por ejemplo, puede realizarse una pequeña reparación en caliente o en frío para reparar un desperfecto espe-

cífico o introducir una modificación menor. También pueden producirse reconstrucciones menores cuando se realiza una reparación programada en frío pero se conserva la mayor parte del refractario y sólo se sustituyen las partes dañadas. La diferencia más importante, que afecta tanto al coste como a la libertad de aplicar nueva tecnología, es si hay un cambio significativo en la carcasa del horno, y por lo tanto en sus dimensiones.

Para hornos pequeños con reconstrucciones más frecuentes y menores costes de inversión, las ventajas de coordinar las mejoras medioambientales y las reparaciones de los hornos son menos significativas, pero las mejoras medioambientales pueden ser más económicas si se coordinan con otras inversiones.

4.2. Selección de la Técnica de Fusión

Las técnicas de fusión utilizadas en la Industria del Vidrio se describen en el Capítulo 2. Los tamaños van desde pequeños hornos de crisoles a grandes hornos regenerativos que producen más de 600 toneladas de vidrio diarias. La elección de la técnica de fusión depende de muchos factores, pero en particular de la capacidad requerida, la formulación del vidrio, los precios de los combustibles, y la infraestructura existente. La elección es una de las más importantes decisiones económicas y técnicas para una planta nueva o para la reconstrucción de un horno. Los factores primordiales son la capacidad requerida y el tipo de vidrio.

La elección entre horno regenerativo o recuperativo es una decisión económica y técnica que generalmente no es una consideración significativa en la determinación de la MTD. Por consiguiente, los aspectos medioambientales sólo se discuten brevemente aquí. La elección entre combustión convencional aire-combustible y fusión eléctrica es un importante factor a la hora de determinar la MTD, y estas técnicas se describen por separado. Análogamente, otras técnicas de fusión específicas, como el horno de fusión Sorg con bajo nivel de NOx, se discuten por separado en las secciones específicas de las sustancias.

Cada una de las técnicas descritas en el Capítulo 2 tiene ventajas, desventajas y limitaciones inherentes. Por ejemplo, en el momento presente, la forma mejor desde el punto de vista técnico y económico de producir vidrio flotado en gran volumen es a partir de un horno regenerativo de llama transversal de gran tamaño. Las alternativas todavía no han sido totalmente probadas en el sector (Ej. fusión con oxícombustión) o ponen en compromiso los aspectos económicos o técnicos del sector (Ej. fusión eléctrica u hornos de recuperación).

El comportamiento medioambiental del horno es producto de una combinación de la elección de técnica de fusión, método de operación, y disponibilidad de medidas de eliminación secundarias. Desde una perspectiva medioambiental, las técnicas de fusión que son inherentemente menos contaminantes o pueden controlarse por medios primarios son generalmente preferibles a las que se basan en eliminación secundaria. No obstante, es necesario considerar los aspectos prácticos desde el punto de vista económico y técnico, y la elección final debe ofrecer un equilibrio optimizado.

El comportamiento medioambiental de las distintas técnicas de fusión varía grandemente según el tipo de vidrio que se produce, el método de operación y el diseño. Por ejemplo, las emisiones (antes de la eliminación secundaria) de un horno de recuperación para vidrio para TV con adición de nitratos y cerca del final de la campaña tendrán poco en común con las de un horno de recuperación para fibra de vidrio de filamentos continuos recién construido que tenga ajustes óptimos de geometría, formulación y combustión. Estos factores hacen que la comparación cuantitativa directa de las distintas técnicas de fusión sea difícil y de valor limitado, y las secciones siguientes sólo resumen las diversas consideraciones medioambientales para cada una de las técnicas descritas en el Capítulo 2. La fusión con oxícombustión y los hornos de fusión de diseños especiales se cubren en las Secciones 4.4.2.5 y 4.4.2.3 respectivamente. Las diferencias en las emisiones de los distintos tipos de hornos se discuten cuando procede en las secciones específicas de las sustancias de este Capítulo.

La fusión eléctrica difiere de las otras técnicas descritas a continuación, ya que supone un cambio fundamental en la tecnología y tiene efectos muy significativos en las emisiones. La fusión eléctrica se

presenta como una de las técnicas específicas para consideración en la determinación de las MTD. Sin embargo, debido a su impacto sobre todas las emisiones, no encaja convenientemente en el enfoque por sustancias de este Capítulo, por lo que se presenta en esta sección.

Hornos Regenerativos

Estos hornos son generalmente más eficaces desde el punto de vista energético que otros hornos de combustibles fósiles, debido a la mayor eficacia de su sistema de precalentamiento del aire de combustión. El bajo consumo energético por tonelada de vidrio fundido produce reducciones en muchos de los contaminantes asociados con la combustión. No obstante, las elevadas temperaturas de precalentamiento favorecen la formación de NOx. Estos hornos han dado resultados muy buenos con técnicas primarias de control de emisiones, particularmente para NOx. De los dos tipos de horno regenerativo, los hornos de llama transversal tienden a tener una mayor eficacia energética y menores emisiones. No obstante, en algunos casos, las medidas primarias de control de NOx pueden producir mayores reducciones en hornos de llama transversal.

El elevado coste de inversión de los hornos regenerativos significa que normalmente son sólo viables económicamente para producción de vidrio a gran escala (generalmente >100 toneladas al día, aunque hay ejemplos de hornos más pequeños). Para ritmos de producción de >500 toneladas diarias, normalmente se utilizan hornos de llama transversal para obtener un buen control del calor a lo largo de todo el horno.

Hornos de Recuperación

Estos hornos son menos eficaces energéticamente que los hornos regenerativos, pero también recuperan una cantidad considerable de calor a través del sistema de recuperación. Es posible obtener mejoras en la eficacia energética aplicando otras técnicas, como refuerzo eléctrico, calderas de recuperación, precalentamiento del gas y precalentamiento de la mezcla/casco de vidrio. Las temperaturas de precalentamiento son más bajas que en los hornos de regeneración, y pueden conseguirse buenos resultados con controles primarios de NOx.

Combinación de Combustibles Fósiles / Fusión Eléctrica

Existen dos enfoques principales al uso de esta técnica, combustión predominantemente con combustibles fósiles con refuerzo eléctrico, o fusión predominantemente eléctrica con refuerzo de combustibles fósiles. En muchos hornos se instala la opción de refuerzo eléctrico (Boosting), que puede representar un 2 – 20% del aporte energético total. Generalmente, en los hornos de vidrio para envases y de vidrio flotado, la cantidad de refuerzo eléctrico es muy limitada (<5 %) debido al coste de la electricidad. El refuerzo eléctrico reduce las emisiones directas del horno mediante la sustitución parcial de la combustión por calentamiento eléctrico para un determinado ritmo de producción. Como se ha indicado en la Sección 4.2.1 siguiente, si se adopta una visión más global, las reducciones conseguidas in situ podrían considerarse frente a las emisiones derivadas de la producción de electricidad.

Los elevados costes asociados con el refuerzo eléctrico significan que por lo general no es una opción de reducción de emisiones que sea viable a largo plazo, por motivos tanto económicos como técnicos. El refuerzo eléctrico tiene un efecto beneficioso sobre las emisiones de los hornos y puede usarse en conjunción con técnicas como quemadores de bajo nivel de NOx para mejorar la fusión y reducir las emisiones, aunque no es una opción económica si se usa aisladamente. El refuerzo eléctrico puede también emplearse para mejorar las corrientes de convección dentro del horno, lo que facilita la transferencia de calor y puede ser de ayuda para el afino.

La combustión auxiliar con combustibles fósiles en un horno con calentamiento eléctrico principal es una técnica mucho menos utilizada. Permite aprovechar muchas de las ventajas medioambientales de la fusión eléctrica, al superar algunas de las limitaciones técnicas y económicas de la técnica. El uso de los quemadores aumenta la velocidad de fusión de las materias primas. Evidentemente, hay emisiones asocia-

das con el consumo de combustible, que dependerán de la relación del suministro de calor. En estos hornos pueden aplicarse muchas de las técnicas de reducción de emisiones discutidas en este capítulo, incluidos quemadores de bajo nivel de NOx y fusión con oxicombustión.

Fusión Discontinua

La técnica normalmente utilizada para la fusión discontinua de bajo nivel es el horno de crisoles, aunque se están popularizando otras técnicas como los hornos diarios o los hornos de fusión flexibles (Flex Melter). La elección de la técnica dependerá habitualmente de la logística de la instalación específica, particularmente la escala de producción, el número de formulaciones distintas producidas, y los requisitos del cliente. Muchas de las medidas de eliminación primarias descritas en este capítulo serán aplicables a estos hornos en mayor o menor medida. Las técnicas más eficaces suelen ser la optimización de las formulaciones de las mezclas y de las técnicas de combustión. Debido al diseño de los hornos de crisoles, las técnicas darán generalmente mejores resultados en hornos diarios y hornos semicontinuos. Cuando sea practicable el uso de hornos diarios o de fusión continua o semicontinua, normalmente se obtendrá una mayor eficiencia energética y menores emisiones.

Fusión de Lana de Roca

La técnica más comúnmente utilizada para la fusión de lana de roca es el cubilote, aunque existen ejemplos de hornos de fusión eléctricos o a gas. En muchos casos, estas otras opciones han sido desarrolladas como plantas en fase de desarrollo para poder estudiar la viabilidad a largo plazo de las técnicas, o se han escogido debido a circunstancias locales particulares. El cubilote presenta una serie de ventajas operativas y es la técnica preferida dentro del sector. Las alternativas no presentan ninguna ventaja medioambiental sustancial o no han demostrado ser viables desde el punto de vista técnico y económico para una aplicación más amplia.

4.2.1. Fusión Eléctrica

Descripción de la Técnica

La técnica se describe en el Capítulo 2, dado que se trata de una técnica de fusión básica común a varios sectores. La fusión eléctrica tiene efectos importantes sobre las emisiones de contaminantes, por lo que también se discute en este capítulo como medida de eliminación “primaria”.

Comportamiento Medioambiental

La sustitución total de los combustibles fósiles en el horno elimina la formación de productos de combustión; en concreto, óxidos de azufre, NOx térmico y dióxido de carbono. Las restantes emisiones se derivan del arrastre de partículas y de la descomposición de las materias de la mezcla, en particular el CO₂ de los carbonatos, el NOx de los nitratos y el SOx de los sulfatos. En la mayoría de aplicaciones, el uso del sulfato es bastante bajo, ya que no es tan importante para el afinado y se utiliza principalmente como agente oxidante.

También puede haber niveles bajos de emisiones de haluros (Ej. HF) o metales si los mismos están presentes en las materias primas. No obstante, las emisiones pueden ser significativas en las formulaciones con adición de fluoruros. La emisión de todos los componentes volátiles de la mezcla es considerablemente menor que en los hornos convencionales debido a la reducción del caudal de gas y la absorción, condensación y reacción de las emisiones gaseosas en la capa de mezcla vitrificante que normalmente cubre toda la superficie del material fundido.

Los hornos son normalmente abiertos por un lado y hay considerables corrientes de aire debido a las emisiones gaseosas y al calor de la fusión. Normalmente es necesario aplicar algún tipo de ventilación para hacer que el polvo, los gases y el calor se escapen sin entrar en el lugar de trabajo. Esto se consigue mediante tiro natural o mediante aspiración. El gas residual emitido por el tiro natural tendrá un volumen muy bajo pero puede tener una elevada concentración de polvo, y malas características de dispersión.

Las emisiones de polvo pueden controlarse mediante aspiración a un sistema de eliminación de polvo, que debido a los bajos volúmenes existentes es normalmente un filtro de mangas. Este esquema produce emisiones de polvo muy bajas y también permite el tratamiento de las emisiones de HF mediante lavado seco si es necesario. Ver Secciones 4.4.1.3 y 4.4.4.2.

Las emisiones reales alcanzadas dependerán en gran medida de la formulación de la mezcla, y debido a los bajos flujos de gases residuales, una comparación de las concentraciones de las emisiones puede resultar engañosa. No obstante, como indicación general, las emisiones directas se reducen en un factor entre 10 y 100 en comparación con un horno convencional con combustión de aire-combustible de un ritmo de producción comparable. En el Capítulo 3 se dan algunos datos cuantitativos actuales para instalaciones de lana mineral, al igual que en los estudios de casos del Anexo 1.

Consideraciones Económicas

La viabilidad económica de la fusión eléctrica depende principalmente del diferencial de precio entre la electricidad y los combustibles fósiles. En el momento presente, los costes medios de la electricidad por unidad de energía son de 4 a 5 veces los costes del fuel-oil. Los costes de la electricidad pueden variar hasta un 100% entre los Estados Miembros, pero los precios de los combustibles fósiles tienden a presentar menos diferencias. Los precios de los combustibles y su variación se discuten en la Sección 4.4.3.1. Los hornos eléctricos son muy eficaces térmicamente, en general de 2 a 4 veces más que los hornos de aire-combustible. En comparación, los hornos grandes y eficaces energéticamente están en el extremo inferior de esta gama, y los hornos pequeños en el extremo superior.

Los hornos eléctricos tienen costes de inversión mucho menores que los hornos convencionales, lo que a lo largo de los años compensa parcialmente los mayores costes operativos. No obstante, los hornos eléctricos tienen vidas útiles más cortas antes de que precisen una reconstrucción o reparación, esto es, de 2 a 6 años, en comparación con los 10 a 12 años de los hornos convencionales. Para hornos convencionales de aire-combustible pequeños (hasta unas 50 toneladas diarias), las pérdidas de calor son relativamente elevadas en comparación con los hornos de mayor tamaño. En el rango de 10 a 50 toneladas/día, debido a las mayores pérdidas de calor específico de los hornos de aire-combustible, el horno eléctrico puede ser más competitivo.

Sobre la base de la práctica actual, se propone lo siguiente como guía indicativa muy general para el tamaño de los hornos eléctricos que pueden ser viables, es decir, que tienen posibilidades de ser una alternativa practicable. Inevitablemente hay excepciones debidas a circunstancias locales.

- ✓ Los hornos de menos de 75 toneladas diarias son generalmente viables.
- ✓ Los hornos en el rango de 75 – 150 pueden ser viables en determinadas circunstancias.
- ✓ Los hornos de más de 150 toneladas diarias no suelen ser viables por regla general.

Las consideraciones económicas también pueden verse muy afectadas por factores específicos locales, como los costes energéticos existentes, los requisitos de calidad del producto, el espacio disponible, los costes de medidas de eliminación alternativas, la legislación vigente, la facilidad de operación y la vida operativa prevista de los hornos alternativos.

En los Estados Miembros en los que la diferencia de precio entre los combustibles fósiles y la electricidad está en el extremo superior del rango indicado, la opción de la fusión eléctrica puede parecer menos atractiva. En tales casos, esto podría hacer que la empresa seleccionara una combinación de otras técnicas con preferencia sobre la fusión eléctrica.

Aplicabilidad

La fusión eléctrica es aplicable en muchas partes de la Industria del Vidrio y es ampliamente utilizada en varios sectores, incluidos los de Fibra Cerámica, Lana Mineral, Vidrio Especial, Vidrio Doméstico

co, y en menor medida en el de Vidrio para envases. Obviamente, la fusión eléctrica sólo puede instalarse en la reconstrucción de un horno. No hay ejemplos conocidos a plena escala productiva de fusión eléctrica en los Sectores de Vidrio Plano o de Fritas. La técnica se utiliza comúnmente para la producción de vidrios potencialmente muy volátiles y contaminantes (Ej. vidrio al plomo y vidrio opalino), así como para productos de gran valor añadido.

El uso amplio de la técnica está limitado por los costes de explotación y por algunas consideraciones técnicas. Como se ha indicado anteriormente, la principal restricción es el coste de explotación y, según una serie de factores, el mismo fija un límite de tamaño superior a la viabilidad económica. El hecho de que la técnica sea potencialmente viable no significa necesariamente que represente la MTD para cualquier aplicación particular.

En el momento actual, la técnica no se está utilizando para producción de vidrio a gran escala (>300 toneladas diarias), por lo que no puede considerarse totalmente probada a nivel técnico o económico.

La fibra de vidrio de filamento continuo se produce con Vidrio-E, que tiene un bajo contenido en sodio, lo que produce una muy mala conductividad eléctrica. La producción de Vidrio-E mediante fusión eléctrica 100% no se considera viable económica o técnicamente en la actualidad.

Actualmente hay en funcionamiento en el Reino Unido una línea experimental de vidrio flotado con un horno calentado eléctricamente. Esta planta se construyó para demostrar el principio de fusión eléctrica de parte superior fría para la producción de vidrio flotado. Esta planta ha funcionado con éxito a escala de planta piloto y ha sido utilizada para producir una gama de vidrios exóticos, cuyas emisiones hubiesen sido muy difíciles de controlar desde un horno con combustión convencional. El experimento ha demostrado asimismo que actualmente no es viable económicamente operar una línea de vidrio flotado a escala de producción (>500 toneladas diarias) con un horno eléctrico. Los principales factores son los elevados costes operativos, las limitaciones del diseño del horno, y la corta vida operativa del horno.

Consideraciones Asociadas

Las emisiones directas del horno se reducen enormemente con esta técnica, y la eficacia térmica es muy elevada. No obstante, a la hora de considerar el comportamiento medioambiental global de la técnica, el impacto medioambiental de la producción de electricidad puede anular algunas de las ventajas. Un análisis cuantitativo completo es imposible dentro del ámbito de este documento. Los aspectos medioambientales asociados con la producción de energía son muy complejos, y varían ampliamente a lo largo de la UE y en ocasiones de una instalación a otra.

La electricidad puede ser suministrada por el suministro general o por un suministro local o especial, lo que puede afectar tanto el coste como la eficacia del suministro. Si la electricidad se toma del suministro general, puede ser de una amplia variedad de fuentes. La producción de electricidad a partir de carbón, fuel-oil, gas, energía nuclear, energía hidráulica y otras fuentes renovables lleva en cada caso distintos aspectos medioambientales asociados.

La diferencia en la eficacia térmica entre la fusión eléctrica y con combustibles fósiles se ve asimismo reducida si se considera la eficacia de la producción de electricidad. De nuevo, depende mucho de la fuente de electricidad, pero para una planta de producción de electricidad convencional que utiliza combustibles fósiles, la eficacia desde el combustible primario hasta el punto de uso de la electricidad es del orden del 30 - 35 %. Para una planta con turbogeneradores a gas natural de ciclo combinado, la cifra estaría más próxima al 50%.

Debido a los bajos volúmenes de gases residuales asociados con la técnica, el coste de los equipos de eliminación posteriores se ve enormemente reducido, y los bajos volúmenes de polvo recogidos pueden reciclarse fácilmente. Las bajas pérdidas por volatilidad reducen asimismo el consumo de materias primas, lo que reduce tanto las emisiones como los costes. Esto es particularmente ventajoso para algunos de los componentes más caros o tóxicos como óxidos de plomo, fluoruros, compuestos de arsénico, bórax, etc.

En general, la fusión eléctrica produce un vidrio de alta calidad muy homogéneo. Para algunas aplicaciones de vidrio doméstico y vidrio especial, este puede ser uno de los motivos principales para escoger la fusión eléctrica.

La opinión tradicional dentro de la Industria del Vidrio es que en los hornos eléctricos de parte superior fría se requiere nitrato sódico o potásico para proporcionar las condiciones oxidantes necesarias para un proceso de fabricación estable, seguro y eficiente. El uso de nitratos afecta directamente las emisiones de NOx, y aunque no es necesario para todas las aplicaciones, puede reducir algunas de las ventajas medioambientales de la fusión eléctrica. El uso de nitratos como agentes oxidantes adquiere importancia cuando se recicla en el horno de fusión material de desecho que contiene compuestos orgánicos. El uso de altos niveles de vidrio recuperado externo (u otros materiales reciclados) puede causar en ocasiones problemas de olores.

Ventajas

- Emisiones directas muy bajas.
- Posible aumento del índice de fusión por m^2 de superficie del horno.
- Mejora de la eficacia energética directa.
- En algunos casos, menores costes de materias primas.
- En muchos casos, la fusión eléctrica da un vidrio de mejor calidad y más homogéneo.
- Reducción del coste de inversión y de los requisitos de espacio del horno.
- Operación potencialmente más simple.

Desventajas

- Elevados costes de explotación.
- Reducción de la vida útil.
- Actualmente no es económica y técnicamente viable para producción de vidrio a gran escala.
- Menos flexible y no adaptada a grandes variaciones en el ritmo de producción para vidrios de alta calidad.
- Implicaciones medioambientales asociadas con la producción de electricidad.

Tabla 4.1: Principales ventajas y desventajas de la fusión eléctrica

Instalaciones de Ejemplo

- ✓ Schott Glas, Mainz, Alemania – Vidrio Especial.
- ✓ Pilkington Glass Technology, St Helens, Reino Unido – Vidrio Plano (Experimental / Especializado).
- ✓ Thermal Ceramics, Merseyside, Reino Unido – Fibra Cerámica.
- ✓ British Gypsum Isover, Runcorn, Reino Unido – Lana de Vidrio.
- ✓ Saint-Gobain Desjonqueres, Mers-les-Bains, Francia – Vidrio para envases.

4.3. Técnicas para la Manipulación de Materias primas

La diversidad de la Industria del Vidrio tiene como consecuencia una amplia variedad de materias primas. La mayoría de estas materias son compuestos inorgánicos sólidos, que pueden ser minerales de procedencia natural o productos sintéticos. Van desde materias primas muy gruesas a polvos muy finos. En la mayoría de sectores se emplean líquidos y en menor medida gases. Las técnicas generales utilizadas para la manipulación de materias primas se describen en el Capítulo 2, Sección 2.1. Hay muy pocos aspectos relativos a la manipulación de materias primas que sean específicos de la Industria del Vidrio. Por consiguiente, este resumen sólo incluye las técnicas que normalmente se considera que constituye una buena práctica en la manipulación de esos tipos de materias primas.

Las materias primas en gran volumen se almacenan normalmente en silos, y las emisiones pueden minimizarse utilizando silos cerrados ventilados a través de equipos de eliminación de polvo adecuados,

como filtros de tejido. Cuando sea factible, el material recogido puede devolverse al silo o reciclarse al horno. Cuando la cantidad de material utilizado no requiera el uso de silos, las materias primas finas pueden almacenarse en contenedores cerrados o sacos herméticos. Las materias primas polvorrientas gruesas pueden almacenarse a cubierto para evitar las emisiones transportadas por el viento. Cuando el polvo suponga un problema particular, algunas instalaciones pueden requerir el uso de vehículos de limpieza de calzadas y técnicas de humedecimiento con agua.

Cuando las materias primas se transporten mediante transportadores por encima de la superficie, es necesario aplicar algún tipo de cobertura para proporcionar protección contra el viento y evitar pérdidas sustanciales de material. Estos sistemas pueden diseñarse para cerrar el transportador por todos los lados. Cuando se utilice transporte neumático, es importante aplicar un sistema hermético con un filtro para limpiar el aire de transporte antes de su emisión. Para reducir el polvo antes del transporte y el “arrastre” de partículas finas del horno, puede mantenerse un porcentaje de agua en la mezcla, normalmente del 0 – 4%. Algunos procesos (Ej. producción de vidrio de borosilicato) utilizan materias primas de mezcla secas, y en este caso el potencial de emisiones de polvo es mayor y se requiere un mayor cuidado (por ejemplo, uso del transporte neumático).

Una zona en la que son comunes las emisiones de polvo es la zona de alimentación del horno. Las principales técnicas para controlar las emisiones en esta zona se detallan a continuación:

- ✓ Humedad de la mezcla.
- ✓ Ligera presión negativa dentro del horno (sólo aplicable como un aspecto inherente de la operación).
- ✓ Aplicación de aspiración, que ventila a un sistema de filtro (frecuente en los hornos de fusión de parte superior fría).
- ✓ Alimentadores helicoidales cerrados.
- ✓ Cierre de las cámaras de alimentación (puede ser necesario aplicar refrigeración).

Las emisiones de polvo pueden producirse directamente a la atmósfera o dentro de las naves de proceso. Cuando esto ocurre, el polvo puede acumularse dentro del edificio y puede producir emisiones fugitivas por el movimiento de corrientes de aire que entran y salen de las naves. En zonas potencialmente muy polvorrientas como las plantas de preparación de mezclas, las naves pueden estar diseñadas con el mínimo de aberturas y puertas, o aplicar cortinas antipolvo cuando sea necesario. En las naves de los hornos, a menudo es necesario asegurar un grado de refrigeración natural, por lo que se dispone de respiraderos. Es importante asegurar un buen estándar de limpieza y que todas las medidas de control de polvo (cierres, aspiración, etc.) funcionen adecuadamente.

Las zona de proceso en las que haya posibilidad de que se produzca polvo (Ej. apertura de sacos, mezclas de fritas, desecho del polvo de los filtros de tejido, etc.) pueden equiparse con aspiración que vaya a parar a una planta de eliminación adecuada. Esto puede ser importante en pequeñas instalaciones en las que se produce un mayor grado de manipulación manual. Todas estas técnicas son particularmente relevantes cuando se manipulan y almacenan materias primas más tóxicas, como por ejemplo óxido de plomo y compuestos de flúor.

Las materias primas volátiles pueden almacenarse de modo que se minimicen las emisiones a la atmósfera. En general, las temperaturas de almacenaje en gran volumen deben mantenerse todo lo bajas que resulte practicable, y deben tenerse en cuenta los cambios de temperatura debidos al calentamiento solar, etc. Para compuestos con una presión de vapor significativa, o para sustancias olorosas, pueden ser necesarias técnicas específicas para reducir las emisiones derivadas de la respiración de los tanques o del desplazamiento de vapor durante los trasvases de líquido.

Las técnicas para reducir las pérdidas de los tanques de almacenamiento a presión atmosféricas son las siguientes:

- ✓ Pintura para tanques con baja absorción solar
- ✓ Control de temperatura
- ✓ Aislamiento de los tanques
- ✓ Gestión de inventarios
- ✓ Tanque de techo flotante
- ✓ Sistemas de trasvase con retorno de vapor
- ✓ Tanques con techo de diafragma
- ✓ Válvulas de presión / vacío, cuando los tanques deban soportar fluctuaciones de presión
- ✓ Tratamientos específicos de las emisiones, como adsorción, absorción, condensación
- ✓ Llenado subterráneo

4.4. Técnicas para Controlar las Emisiones a la Atmósfera de las Actividades de Fusión

4.4.1. Partículas

[tm18 CPIV, tm30 Dust]

A los efectos de este documento, por el término material en partículas se entiende todo material que es sólido en el punto de medición, mientras que para las emisiones de las actividades de fusión se considera sinónimo del término polvo. Ambos términos se utilizan indistintamente a lo largo de este capítulo. Por el término total partículas se entiende todas las materias sólidas inorgánicas y orgánicas (sin límite inferior de tamaño), gotas y aerosoles. La temperatura en el punto de medición es particularmente importante para los hornos de vidrio, ya que algunos de los materiales que forman polvo (particularmente boratos) pueden ser volátiles a temperaturas bastante bajas. Asimismo, la naturaleza del polvo de estos procesos hace muy difícil una medición precisa.

La naturaleza de las emisiones de polvo de los hornos de vidrio varía para distintos procesos, pero depende principalmente del diseño y la operación del horno, y de la composición del vidrio. Las principales fuentes de polvo de la fusión son:

- ✓ Arrastre de material de la mezcla.
- ✓ Volatilización y reacción de sustancias de las materias de la mezcla y el vidrio fundido.
- ✓ Impurezas metálicas en los combustibles.

Para hornos alimentados con combustibles fósiles, la volatilización y reacción/condensación subsiguiente de los compuestos volátiles liberados por la superficie del vidrio caliente representa con mucho la mayor parte de las emisiones globales de polvo. En general, entre un 80 y un 95% de las emisiones de polvo se producen de este modo. Por consiguiente, es importante asegurar que las sustancias volátiles hayan sido condensadas antes de tratar o medir el gas residual. Esto no supone un problema para el sulfato sódico (punto de fusión 888 °C), pero debe tenerse en consideración para los gases de combustión que contienen boratos.

El arrastre de las materias primas de la mezcla representa normalmente menos del 5% de las emisiones finales en un horno moderno y en buenas condiciones de funcionamiento. El polvo está compuesto por los componentes de la mezcla, principalmente por los compuestos más ligeros.

Las impurezas metálicas en los combustibles (vanadio y níquel) contribuyen a las emisiones de polvo, pero a un nivel generalmente bastante inferior al 5% del total. Estas impurezas se originan principalmente en el fuel-oil, que también puede añadir una pequeña cantidad de ceniza al total. Las impurezas metálicas pueden también producirse en el vidrio recuperado y otras materias primas.

Los mecanismos de volatilización del material y formulación de las partículas no han sido totalmente desvelados para todos los tipos de vidrio. Aproximadamente un 90% de todo el vidrio producido en la UE es vidrio sodocálcico, y la mayor parte de la información disponible es sobre estas composiciones. El polvo de los hornos de vidrio sodocálcico está compuesto predominantemente por sulfato sódico. Hasta un 98% del polvo está compuesto por sustancias solubles, de los cuales un 80 – 90% es sulfato sódico. El resto dependerá de la composición precisa del vidrio, pero contendrá muchos sulfatos, en particular K_2SO_4 . La fracción insoluble contiene principalmente sílice, con niveles más bajos de metales (Ej. Al, Fe, y Cr). Si se utiliza vidrio recuperado externo, el polvo puede contener otros componentes (Ej. plomo). El diámetro de las partículas es generalmente del orden de 0,02 a 1 μm , pero las partículas pequeñas se aglomeran fácilmente formando partículas grandes. Pueden distinguirse una serie de distintos procesos de volatilización, que se discuten en la Sección 4.4.1.1 siguiente.

Para vidrios que contienen niveles sustanciales de boro en su composición (Ej. fibra de vidrio de filamentos continuos, lana de vidrio y vidrio de borosilicato), los boratos son un componente esencial del polvo emitido. La relación de sulfato sódico y boratos en el polvo dependerá de la composición del vidrio. En las formulaciones con bajo nivel alcalino, como el Vidrio-E y la lana de vidrio, los compuestos a base de borato representan más del 85% de las emisiones totales de polvo. El resto estará compuesto por sulfatos, sílice y compuestos que dependen de los componentes minoritarios y de las impurezas de la mezcla.

En el vidrio con plomo (vidrio para TV y vidrio al plomo), la volatilización del plomo produce condensaciones de óxido de plomo o en ocasiones de sulfato de plomo.

En los hornos de fusión eléctricos de parte superior fría, la emisión de polvo es mucho menor y se deriva casi exclusivamente del arrastre de material de la mezcla. La ausencia de una atmósfera de combustión a alta temperatura impide la formación de partículas por volatilización reactiva. En los cubilotes para la producción de lana de roca, las emisiones de polvo son una combinación de polvo de las materias primas, productos de combustión, y productos volátiles emitidos durante la fusión y luego condensados.

Las emisiones a la atmósfera de metales de los procesos de vidrio se hallan contenidas en gran medida en las materias en partículas. Por este motivo, los metales no se tratan separadamente en este capítulo, sino que se discuten respecto a las emisiones de polvo, y cuando procede se hacen referencias a otras secciones. No obstante, en algunas circunstancias puede haber emisiones metálicas gaseosas significativas, por ejemplo selenio de los vidrios bronceados o incoloros, y plomo de algunos procesos de vidrio al plomo o vidrio especial.

Las principales fuentes de metales son las impurezas en las materias primas, los metales de las materias primas/aditivos utilizados para conferir propiedades específicas (Ej. óxidos de plomo y colorantes/decolorantes), vidrio recuperado y combustibles. El vidrio recuperado externo es una importante fuente de contaminación por metales, especialmente de plomo (en algunos casos >400 ppm), aunque también de otros metales; por ejemplo, puede producirse contaminación por mercurio si el vidrio recuperado contiene tubos de lámparas de vapor de mercurio. La información sobre los niveles de emisiones de metales se facilita en las secciones de los sectores específicos en el Capítulo 3 y en la Tabla 3.3.

Existen tres enfoques principales al control de las emisiones de metales dentro del polvo o como componentes gaseosos.

1. Selección de las materias primas para minimizar la contaminación y, si es practicable, uso de aditivos alternativos. La selección de materias primas incluye la obtención y clasificación de vidrio recuperado.
2. Técnicas de eliminación de polvo, en particular sistemas de filtros de mangas y precipitadores electrostáticos. Cuando las emisiones contienen concentraciones significativas de metales, los sistemas de eliminación de polvo de gran eficacia pueden reducir las emisiones a menos de 5 mg/Nm³.
3. Las emisiones gaseosas de metales (Ej. selenio) pueden reducirse sustancialmente mediante el uso de técnicas de lavado seco o semiseco en combinación con eliminación de polvo, ver Sección 4.4.3.3.

En algunos casos, en particular en Alemania, un factor importante en los motivos para la instalación de sistemas de eliminación de polvo en combinación con lavado seco o semiseco ha sido la reducción de las emisiones de metales.

4.4.1.1. Técnicas Primarias

[tm18 CPIV, tm30 Dust]

Un horno de vidrio es un entorno muy dinámico, y cualquier cambio en la química o las condiciones operativas puede tener consecuencias en el proceso de fusión, así como en otras emisiones. Por este motivo, es importante considerar todas las técnicas primarias descritas en este documento como un conjunto, más que como simples técnicas individuales. No obstante, para mayor claridad, las técnicas han sido descritas obligatoriamente por separado, aunque los efectos consiguientes se discuten cuando es posible.

Se consigue un bajo nivel de emisiones del arrastre de materias manteniendo un nivel de humedad en las materias primas y controlando la cobertura de la capa de materias primas de la mezcla, el tamaño de las partículas, la velocidad de los gases y la posición de los quemadores. Para los procesos que requieren materias primas de mezcla secas o muy finas, las cifras pueden ser ligeramente mayores. No obstante, la contribución a las emisiones globales serán sólo menores en comparación con la contribución de las especies volátiles. Los aspectos relativos al polvo derivado de la mezcla de materias primas se detallan en la Sección 4.3 anterior.

Debido a que las emisiones de polvo se originan principalmente de sustancias volátiles, las técnicas de eliminación primaria aquí discutidas se concentran en esta fuente. Del análisis del polvo de los hornos de vidrio sodocálcico puede concluirse que los compuestos sódicos son los principales componentes que producen la formación de polvo en los gases de combustión. Las sustancias volátiles de la mezcla (Ej. NaCl) y del material fundido (Ej. NaOH) reaccionan con óxidos de azufre para formar Na₂SO₄, que condensa en el gas residual por debajo de 1.100°C. En la mayoría de casos, se utiliza sulfato sódico como agente de afino. La disociación del sulfato sódico en el vidrio fundido produce concentraciones de óxido de azufre, que son mucho mayores que las concentraciones de los componentes sódicos en la cámara de combustión y en los gases de combustión. Los óxidos de azufre de la combustión del combustible o de los sulfatos de la mezcla se hallan disponibles en exceso estequiométrico en comparación con el sodio volatilizado, que es el parámetro gobernante para la formación de polvo. Las principales fuentes de sodio son el vidrio recuperado o el carbonato sódico, mientras que el sodio del sulfato sódico no es un factor significativo.

En gases muy exentos de azufre, pueden formarse partículas de cloruro sódico, fluoruro sódico o carbonato sódico durante el enfriamiento de los gases de combustión por debajo de 900 °C. Esto no es frecuente, y sólo puede ocurrir cuando el sulfato sódico es sustituido por otro agente de afino, como el antimonio. Esto nunca ocurre en el vidrio para envases o el vidrio plano, pero puede suceder en aplicaciones especiales.

En el vidrio sodocálcico pueden distinguirse una serie de distintos procesos de volatilización:

- (a) Volatilización reactiva de la superficie del vidrio fundido. El óxido sódico del material fundido de silicato reacciona en la superficie con vapor de agua: Na_2O (fundido) + $\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2 \text{NaOH}$ (g). Este tipo de volatilización puede ser la fuente principal de emisiones de polvo en los hornos de vidrio sodocálcico.
- (b) Volatilización del NaCl presente como impureza en la sosa sintética. La volatilización produce no sólo sulfato sódico, sino también la formación de HCl.
- (c) Volatilización del sulfato sódico de la superficie del vidrio fundido.
- (d) Volatilización reactiva por reacciones químicas en la superficie de la capa exterior de la mezcla con los componentes de la atmósfera del horno. Se cree que el vapor de agua presente en la cámara de combustión es importante para la reacción del carbonato sódico para formar vapores de hidróxido sódico, con reacciones similares para los compuestos de potasio: $\text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2 \text{NaOH(g)} + \text{CO}_2$.
- (e) La volatilización de los componentes de las materias primas de la superficie de la capa exterior de la mezcla (como arena, feldespato, carbonato sódico, dolomita y sulfato sódico) es generalmente muy baja. Las presiones de vapor son muy bajas por debajo de 1.200 °C, y por encima de 1.000 °C los componentes individuales ya reaccionan para formar silicatos.
- (f) La volatilización de los componentes de sodio en las burbujas de gas durante el proceso de afinado es también de una importancia relativamente pequeña.
- (g) En el caso de reciclaje de vidrio recuperado externo (hornos de vidrio para envases), pueden producirse emisiones de los componentes de plomo (PbO , PbCO_3 , PbSO_4) debido al vidrio con plomo, fragmentos de espejos y contaminantes de plomo metálico presentes en el casco de vidrio.

La situación es distinta para otros tipos de vidrios. Para los vidrios bajos en componentes alcalinos que contienen boro (Ej. Vidrio-E y lana de vidrio), la volatilización reactiva se considera que es la principal fuente de partículas. El polvo emitido está compuesto principalmente por los productos de reacción del ácido metabórico con sodio y potasio. El ácido metabórico está formado por la reacción del ácido bórico con vapor de agua: B_2O_3 (l) + $\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2 \text{HBO}_2$ (g). La formación de polvo por volatilización se produce muy fácilmente para los vidrios que contienen boro, y la concentración de las emisiones no eliminadas es generalmente mayor que para los vidrios sodocálcicos. En algunos casos son más de diez veces mayores.

Los tipos de mecanismos de volatilización descritos para el vidrio sodocálcico son la base general de volatilización en la mayoría de otros vidrios, pero evidentemente hay una variación según la composición química.

Los factores más importantes que afectan la volatilización son la temperatura, el contenido de vapor de agua de la atmósfera del horno, y las velocidades de los gases en la superficie del material fundido. La disponibilidad de las sustancias reactivas es también un factor importante, particularmente del sodio y los sulfatos en el vidrio sodocálcico, y del boro en los vidrios al boro. No obstante, este factor está a menudo limitado por la química del vidrio.

A continuación se detallan las medidas primarias más importantes que pueden adoptarse para reducir las emisiones de polvo.

Modificación de las materias primas

El cloruro sódico puede ser un factor significativo en las emisiones de polvo y cloruros. Se utiliza en algunos vidrios especiales como agente afinante, pero lo más frecuente es que esté presente como impureza de bajo nivel en el carbonato sódico fabricada por el proceso Solvay. La presión de la Industria del Vidrio ha hecho que los productores de carbonato sódico reduzcan los niveles de NaCl significativamen-

te en años recientes (ahora suele estar alrededor de 1 kg/tonelada). Otra reducción significativa a corto plazo requeriría probablemente un proceso ulterior y por consiguiente un aumento de precio. Hay disponible carbonato sódico natural que está virtualmente libre de NaCl, pero este material es generalmente más caro en la UE debido a los impuestos y los costes de transporte desde los países de origen.

En la mayoría de hornos modernos, los niveles de sulfatos en las mezclas han sido reducidos al mínimo que permita un buen afinado y el mantenimiento del estado de oxidación correcto del vidrio. Las alternativas al sulfato sódico pueden plantear un problema medioambiental, como por ejemplo los agentes de afino a base de arsénico y antimonio. Los progresos ulteriores en esta área no se espera que produzcan reducciones sustanciales de las emisiones. Se cree que el factor limitante es la concentración de los vapores que contienen sodio, pero para hornos con combustión a gas concentraciones muy reducidas de sulfatos limitarían la reacción en la fase gaseosa.

En los vidrios que contienen boro, éste es esencial en la formación de los productos y en sus características. En años recientes se han realizado reducciones sustanciales en los niveles de boro, pero se hace difícil realizar progresos ulteriores sin afectar la productividad, el consumo de energía y la calidad. Las materias primas que contienen boro son relativamente caras y se hacen todos los esfuerzos para reducir su consumo. En el momento presente no hay disponibles alternativas válidas al boro, y las dificultades han hecho que muchas empresas instalen técnicas de eliminación secundarias, particularmente para hornos de lana de vidrio y de vidrio de borosilicato. En general, el polvo eliminado se recicla al horno.

Una serie de empresas del sector de Fibra de Vidrio de Filamentos Continuos han desarrollado vidrios con composiciones que tienen bajos niveles de boro y flúor, o que sólo contienen estos elementos debido a que las materias primas contienen trazas de los mismos. Se han reportado emisiones por debajo de 50 mg/Nm³, que demuestran la importancia del boro en la formación del polvo. Este tipo de vidrio requiere una temperatura de fusión más elevada, es más difícil de fibrar, y todavía deben determinarse sus efectos a largo plazo sobre la vida de los materiales refractarios. Los detalles de la técnica son confidenciales, por lo que, aunque es extremadamente prometedora, la técnica no puede considerarse aún como disponible de forma general. Los progresos varían según las distintas empresas, pero actualmente ya se comercializan varias de estas formulaciones.

Reducción de la temperatura en la superficie del material fundido

La temperatura de bóveda es un importante factor en la formación de partículas, dado que a temperaturas superiores se generan más especies volátiles. En los hornos de vidrio sodocálcico se ha observado una correlación entre la temperatura de bóveda y la formación de partículas. La reducción de la temperatura del horno debe estar equilibrada con la calidad del vidrio y la productividad del horno. Las medidas que tienen mayor efecto en la reducción de la cantidad de polvo por tonelada de vidrio son las que mejoran la eficiencia energética y en particular la transferencia de calor al vidrio, lo que permite una temperatura de bóveda más baja. Los principales puntos son:

- El diseño y la geometría del horno, para mejorar las corrientes convectivas y la transferencia de calor. Estas modificaciones sólo pueden aplicarse en la reconstrucción del horno. Los hornos grandes son generalmente más eficaces desde el punto de vista energético, lo que produce asimismo menores emisiones por tonelada de vidrio.
- El refuerzo eléctrico ayuda a reducir la temperatura de bóveda aplicando energía directamente en el material fundido y mejorando las corrientes convectivas. La posición de los electrodos es importante, pero es difícil de cambiar excepto en la reconstrucción del horno. El uso de refuerzo eléctrico está normalmente limitado por el coste de la electricidad.
- El uso creciente de casco de vidrio reduce los requisitos de energía de fusión, lo que permite un funcionamiento a temperatura más baja y un menor consumo de combustible. Asimismo, dado que el casco de vidrio ya ha sido fundido, ayuda a reducir el nivel de algunas de las especies volá-

tiles y reactivas, que contribuyen a la formación de polvo, como el cloruro sódico y los sulfatos presentes en la mezcla. En los hornos con combustión de fuel-oil, el uso de casco de vidrio reduce asimismo el consumo de fuel-oil y por consiguiente los niveles de SO₂. El uso de casco de vidrio está limitado por la disponibilidad de vidrio recuperado de la calidad y composición correctas. Por ejemplo, los hornos de vidrio para envases utilizan un 5 - 95 % de casco de vidrio (interno y externo), los hornos de vidrio doméstico sodocálcico y de vidrio plano suelen usar un 10 - 40 % (normalmente sólo interno), mientras que los hornos de fibra de vidrio de filamentos continuos raramente lo emplean.

Posición de los quemadores

Otro factor importante en la velocidad de volatilización desde el material fundido es la velocidad de sustitución de los gases situados encima. Una elevada velocidad de los gases o un alto nivel de turbulencia en la superficie del material fundido aumenta la velocidad de volatilización. Se han realizado progresos con la posición de los quemadores para optimizar la velocidad y dirección del aire de combustión, así como la velocidad y dirección del combustible. También se han realizado trabajos encaminados a combinar estos cambios con modificaciones en la anchura del horno y la longitud de la parte no quemada de la capa de cobertura. Los cambios que supongan modificaciones en el diseño del horno sólo pueden realizarse en la reconstrucción del horno, y otros cambios son a veces más eficaces si se llevan a cabo junto con una reconstrucción del horno.

Conversión a combustión a gas (o fuel-oil muy bajo en azufre)

La conversión de combustión a fuel-oil a combustión a gas natural puede ofrecer reducciones sustanciales en las emisiones de polvo. Ello es probablemente debido a las especiales reacciones de condensación de las partículas con el gas natural, aunque en algunos casos la reducción de los niveles de SOx puede ser un factor. Por ejemplo, el sector de vidrio plano ha reportado reducciones de las emisiones de polvo superiores al 25% con la conversión de combustión a fuel-oil a combustión a gas. El sector del vidrio plano ha reportado asimismo un efecto significativo con la reducción del contenido de azufre del fuel-oil (reducción de 20 mg/Nm³ en el polvo por una reducción del 1 % en el contenido de azufre del fuel-oil). Se observó un efecto similar en el vidrio doméstico con un fuel-oil de bajo contenido de azufre (< 1%). La conversión a combustión a gas natural se discute con mayor detalle en la Sección 4.4.3.1. A continuación se resumen los puntos más importantes:

- ✓ La mayoría de las plantas ya están equipadas para usar cualquier tipo de combustible, aunque algunas pueden no tener acceso a un suministro de gas natural.
- ✓ Los costes de la técnica dependerán principalmente de los precios vigentes de los combustibles.
- ✓ Existe preocupación dentro de la industria de que la transferencia de calor al material fundido es peor que con la combustión a fuel-oil, debido a la más baja luminosidad de la llama.
- ✓ La combustión a gas natural puede producir mayores emisiones de NOx que la combustión a fuel-oil.
- ✓ Algunos casos de combustión mixta utilizando simultáneamente ambos tipos de combustibles en un horno pueden ofrecer compromisos interesantes de los dos tipos de procesos de fusión (bajas emisiones de NOx, SOx y polvo).

Otras consideraciones

Las emisiones de los hornos de fusión eléctricos de parte superior fría pueden minimizarse reduciendo los caudales de aire y la turbulencia durante la mezcla, y mediante la optimización del tamaño de gránulo y de la humedad de las materias primas. Raramente se aplican medidas primarias para las emisiones de polvo de los cubilotes para lana de roca. La principal acción que podría tomarse sería el lavado de las

materias primas para eliminar el polvo. No obstante, la mayoría de cubilotes están equipados con filtros de mangas, por lo que hay pocos incentivos para adoptar medidas primarias, dado que es muy improbable que se pueda cambiar la necesidad de medidas secundarias.

Eficacia medioambiental de las técnicas primarias

Los niveles de emisiones alcanzables con técnicas primarias son difíciles de cuantificar, debido a la amplia gama de factores que pueden afectar los resultados y la amplia variación en los tipos de hornos y en las formulaciones de los vidrios.

Para hornos de llama, los niveles de emisiones más bajos, utilizando sólo técnicas de eliminación primarias, se consiguen en los hornos que producen vidrios sodocálcicos. Las masas emitidas medias están alrededor de 0,4 kg/tonelada de vidrio fundido, y la mayoría de las concentraciones de las emisiones están en el rango de 100 - 300 mg/Nm³. Hay algunos hornos que consiguen niveles de polvo de menos de 100 mg/Nm³, pero son infrecuentes.

Mediante la optimización de las técnicas primarias (sobre la base del conocimiento actual y de las mejoras esperadas en el funcionamiento del horno), la industria del vidrio sodocálcico ha indicado que un valor entre 70 y 100 mg/Nm³ podría ser una emisión de polvo alcanzable de forma realista en un futuro no muy lejano. En el momento presente, pocas plantas tienen niveles de emisión de polvo de menos de 100 mg/Nm³ sin eliminación secundaria, y 100 - 200 mg/Nm³ (A0,4 kg/tonelada de vidrio) se considera un valor actualmente alcanzable con medidas primarias. Es improbable que estas cifras puedan alcanzarse para composiciones de vidrio que no sean de sodio-calcio. En general, para otras composiciones, cabría esperar que la optimización de las técnicas primarias redujera las emisiones en un 10-30%.

Consideraciones económicas

Hay muy pocos datos disponibles sobre los costes de las técnicas primarias, pero la industria ha reportado que los costes de las medidas aplicadas hasta la fecha se consideran bajos. Ciertamente, las técnicas que reducen el consumo energético pueden producir ahorros de costes. Los costes relativos a la combustión a gas se discuten en la Sección 4.4.3.1.

Las medidas primarias pueden comportar costes variables, según el nivel y la escala de tiempo de su aplicación. Las medidas son un paquete global, y es la optimización del paquete lo que determina los costes y resultados. Por ejemplo, el uso de carbonato sódico baja en cloruros o natural es improbable que reduzca las emisiones de polvo a niveles comparables con la eliminación secundaria y, dependiendo de otros factores, los costes pueden ser desproporcionados en comparación con las ventajas. No obstante, se trata de un aspecto del paquete de medidas, cuyos costes y resultados deben considerarse en conjunto.

Aplicabilidad

Los principios descritos se consideran generalmente aplicables a todas las partes de la industria dentro de los límites indicados. No obstante, las técnicas aplicadas con éxito en un proceso pueden no tener los mismos efectos en otras plantas. A corto y medio plazo, las medidas primarias de eliminación de polvo permiten conseguir reducciones más significativas para las formulaciones de sodio-calcio que para otros tipos de vidrio.

Consideraciones asociadas

Ventajas

- Bajo coste.
- Más centrada en la prevención que en la eliminación.
- No comporta el consumo energético o los posibles residuos sólidos asociados con las técnicas secundarias.

Desventajas:

- Las medidas primarias no pueden alcanzar los niveles de emisiones asociados con técnicas secundarias como los precipitadores electrostáticos. Esto no es probable que cambie en un futuro próximo.
- Las medidas primarias imponen restricciones operativas adicionales sobre el proceso.

Tabla 4.2: Principales ventajas y desventajas de las técnicas primarias para la reducción de polvo

4.4.1.2. Precipitadores Electrostáticos

Descripción de la técnica

Los precipitadores electrostáticos (PE) pueden operar en una amplia gama de condiciones de temperatura, presión y nivel de partículas. No son particularmente sensibles al tamaño de las partículas, y pueden recoger partículas en condiciones tanto húmedas como secas. Un PE consiste en una serie de electrodos de descarga de alto voltaje y de lo correspondientes electrodos colectores. Las partículas se cargan y son separadas seguidamente de la corriente de gas por influencia del campo eléctrico generado entre los electrodos. El campo eléctrico se aplica entre los electrodos mediante una pequeña corriente continua a alto voltaje (hasta 80 kV). En la práctica, el PE está dividido en una serie de zonas discretas (pueden usarse hasta 5 campos).

Las partículas se eliminan de la corriente de gas en cuatro etapas:

- ✓ Aplicación de una carga eléctrica a las partículas;
- ✓ Migración de las partículas dentro del campo eléctrico;
- ✓ Captura de las partículas en el electrodo colector; y
- ✓ Eliminación de las partículas de la superficie del electrodo.

Los electrodos de descarga deben recibir agitación o vibración para evitar la acumulación de material, y su resistencia mecánica debe ser compatible con la transmisión de la agitación o de la vibración. La fiabilidad mecánica de los electrodos de descarga y de su estructura de soporte es importante, ya que un solo cable roto puede cortocircuitar todo un campo eléctrico del precipitador. En los precipitadores húmedos, el material recogido se quita de las placas del colector enjuagando con un líquido apropiado, normalmente agua, mediante un rociado intermitente o continuo.

La eficacia de un PE sigue la Fórmula Deutsch, que relaciona la eficacia de recogida de polvo con la superficie total de los electrodos colectores, el caudal volumétrico de los gases y la velocidad de migración de las partículas. Para un material dado, la maximización de la superficie de los electrodos colectores y el tiempo de estancia en los campos eléctricos son dos de los parámetros más importantes. Asimismo, cuanto mayor es la distancia entre los electrodos colectores, mayor es el voltaje que puede aplicarse. Esta distancia depende del diseño del proveedor de los electrodos.

Un buen diseño del rectificador incluye el uso de secciones de rectificación independientes para cada zona o parte de una zona del PE. Esto permite variar el voltaje aplicado en las zonas de entrada y salida para tener en cuenta la menor carga de partículas hacia la salida, y permite la operación de las zonas a

voltaje progresivamente mayores. Un buen diseño está también influenciado por el uso de sistemas de control automáticos, que aseguran que se aplique a los electrodos el voltaje de alta tensión (AT) óptimo. Las fuentes de corriente de alta tensión fijas tienen poca probabilidad de proporcionar eficacias de recogida óptimas.

La resistividad (la inversa de la conductividad) de las partículas es especialmente importante. Si es demasiado baja, las partículas que llegan al electrodo colector pierden su carga fácilmente y puede producirse la reentrada de las partículas. Cuando las partículas tienen una resistividad demasiado elevada, se forma una capa aislante sobre el electrodo, que impide la descarga normal de la bóveda y reduce la eficacia de recogida. La mayoría de partículas presentes en la Industria del Vidrio tienen una resistividad dentro del rango correcto. No obstante, en caso necesario, puede mejorarse la recogida acondicionando las partículas, por ejemplo con amoniaco y trióxido de azufre, aunque generalmente no es necesario en los procesos de vidrio. La resistividad puede asimismo reducirse reduciendo la temperatura del gas o añadiendo humedad al gas.

Para conseguir la máxima eficacia de un precipitador, es esencial que el flujo de gas a través de la unidad sea uniforme y que no haya gas que se desvíe fuera del campo eléctrico. El correcto diseño de los conductos de entrada y el uso de dispositivos de distribución de flujo en la boquilla de entrada deben conseguir un flujo uniforme en la entrada del precipitador. En general, la temperatura operativa debe mantenerse por debajo de 430 °C. La eficacia de un PE disminuye con un funcionamiento prolongado. Los electrodos pueden romperse, desalinearse o tener incrustaciones, y un mantenimiento regular es necesario, especialmente en equipos antiguos.

En aplicaciones en las que la corriente de gas puede contener concentraciones importantes de gases ácidos (en particular SO_x, HCl y HF), generalmente se considera necesario utilizar alguna forma de lavado de gases ácidos antes del PE. Normalmente se trata de un lavado seco o semiseco con hidróxido cálcico, carbonato sódico o bicarbonato sódico. Estas técnicas se discuten en la Sección 4.4.3. Los gases ácidos se originan de las materias primas y de la combustión del fuel-oil, y sin eliminación de gases ácidos el PE podría sufrir graves problemas de corrosión. En algunos vidrios que contienen boro, el álcali ayuda también a precipitar los compuestos volátiles de boro. Si los gases residuales no contienen niveles elevados de gases ácidos (Ej. combustión a gas y materias primas con bajo contenido en azufre), el pretratamiento puede no ser necesario, como en la mayoría de procesos de lana de vidrio.

Eficacia medioambiental

Los PE son muy eficaces para recoger polvo dentro del rango de 0.1 µm – 10 µm, y la eficacia global de recogida puede ser del 95 - 99 % (según la concentración de entrada y el tamaño del PE). La eficacia real varía principalmente de acuerdo con las características del gas residual y el diseño del PE, pero pueden obtenerse concentraciones de emisión del orden de 5 a 50 mg/Nm³. Aunque es un factor importante, la eficacia no depende exclusivamente del número de campos eléctricos aplicados. Un PE de dos etapas de un determinado diseño puede ser tan eficaz como un PE de tres etapas de otro diseño o en una aplicación distinta, y la elección dependerá del nivel de eficacia necesario.

En la mayoría de aplicaciones, un PE moderno y bien diseñado de dos o tres etapas puede conseguir 20 mg/Nm³ y menos de 0,1kg de polvo por tonelada de vidrio fundido. En la Industria del Vidrio, casi todos los ejemplos de PE son de dos etapas, y los de diseño moderno pueden conseguir las cifras indicadas. En muchas aplicaciones, los PE pueden alcanzar cifras por debajo de estos niveles si se dan condiciones favorables o se utilizan diseño de alta eficacia. Los niveles de emisiones de los PE pueden a veces ser inferiores a 10 mg/Nm³. No obstante, excepto si se dan condiciones favorables, garantizar una eficacia de este nivel comportaría por lo general costes mayores que los indicados en esta sección.

En instalaciones con varios hornos, el PE puede ser común.

Consideraciones económicas

Los principales factores que afectan los costes de los PE son:

- ✓ Volumen de gas residual;
- ✓ Eficacia requerida;
- ✓ Número de campos;
- ✓ Acondicionamiento del gas residual;
- ✓ Si se requiere lavado de gases ácidos; y
- ✓ Costes de desecho del polvo si no es posible reciclarlo).

Cada campo eléctrico adicional por encima de dos aumenta los costes de inversión en un 15 - 20 %.

La tabla inferior da una indicación de los costes de inversión y costes operativos de PE para distintos tamaños de hornos y caudales de aire, incluido lavado de gases ácidos. Las cifras indicadas pueden variar en más o menos un 15% para los costes de inversión, y en un 30% para costes operativos, según una serie de factores específicos de cada centro de producción. Los costes operativos incluyen el coste del lavado de gases ácidos, aunque no incluyen intereses ni amortización. Para instalaciones que no requieren lavado de gases ácidos, los costes de inversión serán aproximadamente un 30% inferiores, y los costes operativos un 30 – 40% menores. Para instalaciones existentes, pueden generarse costes adicionales (generalmente de un 5 – 20%) si se requieren modificaciones en la configuración existente.

Tamaño, toneladas/día	Volumen de Gas Nm ³ /hora	Costes de inversión (x1000) euros	Coste operativo (x1000) euros anuales
50 t/d Envases	6.400	565	37
100 t/d Envases	11.120	875	53
300 t/d Envases	23.000	1.420	89
450 t/d Envases	33.350	1.820	116
600 t/d Flotado	70.000	2.750	186
100 t/d Filamentos	-	-	64

Tabla 4.3: Costes de precipitadores electrostáticos con lavado de gases ácidos [tm32 Beerkens]

Los costes de infraestructuras variarán en función del tamaño del PE y de las circunstancias locales de cada instalación. Como se ha comentado anteriormente, los PE pueden ser bastante grandes, y en las instalaciones existentes puede ser necesario realizar obras considerables si el espacio es limitado.

Aplicabilidad

En principio, esta técnica es aplicable a todas las instalaciones nuevas y existentes en todos los sectores. Los costes tienden a ser mayores para las plantas existentes, particularmente cuando hay restricciones de espacio. No obstante, para hornos eléctricos y hornos convencionales pequeños (menos de 200 toneladas diarias), los elevados costes de inversión pueden hacer que las empresas opten por técnicas alternativas, en particular filtros de mangas. Los PE no se utilizan con los cubilotes para lana de roca debido al riesgo de explosión asociado con el monóxido de carbono.

Hay muchos ejemplos de PE utilizados con éxito dentro de la Industria del Vidrio; por ejemplo, en Alemania hay unos 80 hornos equipados con PE y lavado de gases ácidos. Cuando la legislación de los Estados Miembros exige a instalaciones de vidrio a gran escala que cumplan límites de emisión de polvo que requieren eliminación secundaria, el PE ha sido la técnica preferida por la industria.

Consideraciones asociadas

El uso de esta técnica comporta un aumento en el consumo de energía, aunque éste es bajo en rela-

ción con el consumo de energía del horno, menos del 1% (entre el 1 y el 3% del coste energético). Habrá un efecto medioambiental resultante en el punto de producción de electricidad, que dependerá de la fuente de electricidad.

En muchas aplicaciones dentro de la Industria del Vidrio será necesario eliminar los gases ácidos antes del tratamiento. Esto se consigue normalmente mediante lavado seco o semiseco, que crea una corriente de material sólido hasta diez veces mayor que el polvo eliminado. Si puede reciclarse al horno, habrá una reducción global en el consumo de materias primas, en caso contrario habrá una corriente residual para desechar.

En la práctica, el polvo recogido puede reciclarse en la mayoría de casos, y según el absorbente escogido, el material puede sustituir una parte de las otras materias primas, particularmente el sulfato sódico (y dado el caso las materias que contienen fluoruros y plomo). Pueden producirse problemas en el Sector de Vidrio para envases, donde los requisitos de sulfato para vidrio reducido, especialmente con altos niveles de casco de vidrio, son muy bajos. Esto podría limitar el potencial de reciclaje del polvo, especialmente si se utiliza un fuel-oil con alto contenido en azufre, y una parte del polvo recogido debería desecharse exteriormente. En algunos sectores, la capacidad de reciclar el polvo recogido puede estar limitada por restricciones de calidad de los productos y por la composición química del vidrio, por ejemplo, cuando se requiere una alta calidad óptica.

En el momento presente, los costes de desecho de un polvo que no puede ser reciclado puede en ocasiones ser mayor que el coste de combustibles con bajo contenido de azufre (Ej. fuel-oil bajo en azufre o gas natural). Por consiguiente, en muchas circunstancias (particularmente vidrio para envases), se preferirá cambiar de combustible a crear un volumen de residuos sólidos para desecho. No obstante, una elevada diferencia de coste entre el combustible bajo en azufre (especialmente el gas natural) y otros combustibles puede hacer que esta opción sea poco atractiva desde el punto de vista económico.

Una de las finalidades principales de la fase de lavado de gases ácidos suele ser el acondicionamiento de los gases para el PE, por lo que también puede tener como consecuencia menores emisiones globales de gases ácidos. Si el polvo se recicla, parte de los gases ácidos serán reemitidos. No obstante, se formará un equilibrio dinámico en el que por lo general la absorción global en el vidrio será mayor, y las emisiones serán menores.

En la Industria del Vidrio, la mayoría de partículas emitidas se forman por volatilización reactiva. Por consiguiente, es importante asegurar que la corriente de gas esté por debajo de la temperatura de formación de partículas. En los hornos regenerativos, la temperatura del gas residual está generalmente alrededor de 400 °C y normalmente no se requiere enfriamiento para condensar los compuestos volátiles o alcanzar los límites operativos del PE. En los hornos de recuperación, la temperatura del gas residual está normalmente alrededor de 800 °C y se requiere su enfriamiento, tanto para condensar partículas como para enfriar el gas hasta los límites del PE. Para vidrios que contienen borato (Ej. lana de vidrio), puede ser necesario reducir la temperatura del gas por debajo de 200 °C antes de la eliminación, asegurando al mismo tiempo que en el sistema se minimice la condensación y el riesgo de corrosión asociado. La temperatura del gas residual de los hornos de oxícombustión es normalmente >1.000 °C y se requiere un enfriamiento sustancial.

Ventajas:

- Elevada eficacia de eliminación de polvo.
- El polvo recogido es generalmente en una forma que permite su reutilización.
- Baja caída de presión en relación con los filtros de mangas, por lo que los costes operativos son generalmente bajos.
- Pueden formar parte de un sistema integrado de tratamiento, por ejemplo con lavadores y SCR.
- Los PE no se bloquean fácilmente, debido a una elevada carga o contenido de humedad, que pueden ser un problema con los filtros de tejido.
- En general (es decir, no limitado a la Industria del Vidrio), hay más experiencia operativa a temperatura elevada que para los filtros de mangas.
- Pueden diseñarse para permitir la adición de nuevos campos en el futuro.

Desventajas:

- Consumo energético. Aunque es bajo en relación con la energía consumida por el horno (<1%), los costes son significativos por tratarse de electricidad.
- Se generan residuos sólidos que no siempre es posible reciclar.
- Muchos procesos requieren lavado de gases ácidos, y en tales casos se consume un absorbente.
- Los PE pueden comportar mayores costes de inversión que otros sistemas.
- Es vital mantener las operaciones de la planta dentro de las condiciones de diseño, o la eficacia puede bajar considerablemente.
- Hay que observar las precauciones de seguridad en el uso del equipo de alto voltaje.
- Los PE pueden ser muy grandes y deben considerarse los requisitos de espacio.

Tabla 4.4: Principales ventajas y desventajas de los precipitadores electrostáticos

4.4.1.3. Filtros de mangas

Descripción de la Técnica

Los sistemas de filtro de tejido se utilizan para muchas aplicaciones dentro de la Industria del Vidrio, debido a su alta eficacia en el control de las partículas finas (impalpables) que se producen en las operaciones con minerales. No obstante, debido a su potencial de obstruirse en ciertas circunstancias, es la opción preferida en todas las aplicaciones. En muchos casos hay soluciones técnicas a estas dificultades, pero puede haber un coste asociado.

El principio básico de la filtración con tejido es seleccionar una membrana de tejido que sea permeable al gas pero que retenga el polvo. Inicialmente, el polvo se deposita tanto en las fibras de la superficie y dentro del espesor del tejido, pero a medida que se acumula la capa superficial, ella misma se convierte en el medio de filtro dominante. A medida que se espesa el aglomerado de polvo, la resistencia al flujo de gas aumenta, y es necesaria una limpieza periódica del medio de filtro para controlar la caída de presión en el filtro. La dirección del flujo de gas puede ser desde el interior de la bolsa hacia el exterior, o desde el exterior al interior.

Los métodos de limpieza más comunes son el flujo de aire inverso, la agitación mecánica, la vibración y los pulsos de aire comprimido. A menudo se utiliza una combinación de estos métodos. Los mecanismos normales de limpieza no hacen que el tejido vuelva a un estado inmaculado. No es beneficioso limpiar excesivamente el tejido, ya que las partículas depositadas dentro del espesor del tejido ayudan a reducir el tamaño de poro entre fibras, lo que permite alcanzar altas eficacias.

Los filtros de tejido están diseñados sobre la base de la velocidad de filtración anticipada, que se define como la máxima velocidad aceptable de gas que fluye a través de una unidad de superficie de tejido (expresada en m/s). Las velocidades de filtración están generalmente en el rango de 0,01 a 0,06 m/s según la aplicación, el tipo de filtro y el tejido. El diseño del filtro debe optimizar el balance entre la caída de presión (coste operativo) y el tamaño (coste de inversión). Si la velocidad de filtración es demasiado grande, la caída de presión será grande y las partículas penetrarán y obstruirán el tejido. Si la velocidad de filtración es demasiado baja, el filtro será eficaz pero muy caro.

Debido a la tendencia de las partículas presentes en el gas residual a adherirse al material de filtro, la limpieza del material de filtro es a menudo difícil. La consecución de un funcionamiento continuo satisfactorio puede verse facilitada por la tendencia de las partículas a aglomerarse, reciclando continuamente una corriente parcial de partículas desprendidas del material del filtro a la corriente de gas sucio.

La selección del tejido debe tener en cuenta la composición de los gases, la naturaleza y tamaño de partícula del polvo, el método de limpieza a emplear, la eficacia requerida y la economía. También debe considerarse la temperatura del gas, junto con el método de enfriamiento del gas, si lo hay, y el vapor de agua resultante y el punto de rocío ácido. Las características del tejido a considerar incluyen la resistencia química, la forma de las fibras y el tipo de hilo, la trama y el acabado del tejido, la resistencia a la abrasión y a la flexión, la resistencia, la eficacia de recolección, los aprestos y la permeabilidad del tejido.

Es esencial mantener la temperatura del gas residual dentro del rango correcto para un sistema de filtro de mangas. El gas debe mantenerse por encima del punto de rocío de cualquier sustancia condensable presente (como H_2SO_4 o agua) y por debajo del límite de temperatura superior del medio de filtro. Si la temperatura es demasiado baja se produce condensación, lo que puede causar la obstrucción de la manga; y si la temperatura es demasiado alta, el material del filtro puede resultar dañado, lo que haría necesaria una costosa sustitución. Los tejidos de filtro convencionales tienen normalmente una temperatura operativa máxima entre 130 °C y 220 °C y, en general, cuando mayor es la temperatura operativa, mayor es el coste. En la mayoría de procesos de vidrio, la temperatura del gas residual está entre 450 y 800 °C. Por consiguiente, el gas debe enfriarse antes del filtro, mediante dilución, enfriamiento con agua o mediante un intercambiador de calor.

Si los gases de combustión pueden contener sustancias ácidas (en particular los hornos con combustión a fuel-oil), se considera necesario instalar una etapa de lavado antes del filtro, para evitar la condensación ácida que dañaría las mangas y la carcasa del filtro. En la práctica no se recomienda utilizar fuel-oil con más de un 1% de azufre (a partir del 2003 está prohibido en España). Para gases de combustión que contienen boro, la etapa de lavado ayuda a precipitar los compuestos volátiles de boro y puede hacer el polvo más fácil de recoger sin bloqueos.

Eficacia medioambiental

Los filtros de tejido son dispositivos de recogida de polvo de gran eficacia, y cabe esperar una eficacia de recogida de un 95 - 99 %. Pueden alcanzarse emisiones de partículas entre 0,1 mg/Nm³ y 5 mg/Nm³, y en la mayoría de aplicaciones cabe esperar niveles consistentemente por debajo de 10 mg/Nm³. Esto equivale generalmente a bastante menos de 0,1 kg por tonelada de vidrio fundido. La capacidad de conseguir niveles tan bajos puede ser importante si el polvo contiene niveles significativos de metales y hay que alcanzar bajas emisiones de metales.

Consideraciones económicas

En general, los costes de inversión son menores que para los precipitadores electrostáticos, pero los costes operativos son mayores. No obstante, a medida que aumenta la competencia en la industria de equipos de eliminación, los costes de los filtros de mangas y de los PE se van acercando, particularmente para grandes volúmenes de gas. Las diferencias tanto de costes de inversión como de costes operativos caen generalmente dentro de los rangos de costes indicados para PE en la Sección 4.4.1.2. La evaluación debe realizarse caso por caso, pero a menudo las plantas pequeñas optan por filtros de mangas debido a su menor coste de inversión y debido a que para caudales de aire bajos los costes operativos se reducen proporcionalmente.

Un ejemplo científico se da en [tm32 Beerkens]. Para un horno de vidrio flotado de 550 - 600 t/día con un volumen de gas de combustión de 65.000 Nm³/hora, los costes de inversión de un filtro y de un lavador semiseco son de unos 3 millones de euros, con costes operativos (excluidos intereses y amortización) de 0,5 millones de euros. Esto supone el reciclaje completo del polvo recogido. Para un horno de

vidrio para envases con un volumen de gases de combustión de 20.000 m³, los costes de inversión de un filtro y de un lavador semiseco son de aproximadamente 1,5 millones de euros.

Aplicabilidad

En principio, los filtros de tejido pueden aplicarse a todos los tipos de hornos dentro de la Industria del Vidrio, y a hornos tanto nuevos como ya existentes. No obstante, en muchos de los sectores no ha sido la técnica de elección debido a los requisitos relativamente altos de mantenimiento y al potencial del tejido a obstruirse, lo que requiere la costosa sustitución del medio de filtro. En los sistemas modernos, algunos de estos problemas han sido superados, y hay ejemplos de filtros de mangas que funcionan bien en plantas de vidrio para envases, plantas de vidrio de borosilicato y una planta de vidrio flotado. La adición de una etapa de lavado y de bajos niveles de azufre en el fuel-oil reduce la tendencia de las bolsas a obstruirse.

Los bloqueos del filtro debidos a la obstrucción del tejido han sido una preocupación particular en los hornos de lana de vidrio con combustión de combustibles fósiles (y algunos otros vidrios que contienen boro), debido a la naturaleza pegajosa de las partículas finas que, sin una etapa de lavado seco, hace difícil evitar los bloqueos. Los hornos son normalmente de combustión a gas con muy bajas concentraciones de sustancias ácidas, y por consiguiente, con un precipitador electrostático no hay necesidad de instalar una etapa de lavado. Esto reduce significativamente los costes de inversión y operativos y facilita mucho el reciclaje del polvo.

Otra preocupación con los filtros de mangas es que la mayoría de hornos con combustibles fósiles requieren un control de presión sensible, y la presencia de un filtro de tejido con una gran caída de presión puede hacerlo más difícil.

Los filtros de mangas han ganado amplia aceptación en una serie de sectores de la Industria del Vidrio, particularmente para pequeños volúmenes de gas. La técnica se utiliza ampliamente en conjunción con hornos eléctricos, cubilotes de lana de roca, hornos de fritas y hornos de fibra cerámica. En algunos hornos pequeños con combustibles fósiles, los filtros de mangas se han escogido como la técnica a usar, junto con sistemas de lavado que se instalan para reducir las emisiones de gases ácidos. Además, para procesos pequeños, los menores costes de inversión de los filtros de mangas en comparación con los precipitadores electrostáticos pueden ser muy atractivos, compensando los gastos asociados con un mayor mantenimiento y el riesgo de obstrucción de las bolsas.

Consideraciones asociadas

Si se incorpora una etapa de lavado con la técnica, se generará una cantidad de residuo sólido que debe reciclarse al horno o desecharse. La fase de lavado produce normalmente menores emisiones globales de gases ácidos (ver Secciones 4.4.3.3 y 4.4.4.2). Si se recicla el polvo, algunos de los gases ácidos se reemitirán. No obstante, se formará un equilibrio dinámico en el que, por lo general, la absorción en el vidrio será mayor, los niveles de algunas materias primas pueden reducirse, y las emisiones globales serán inferiores. La eficacia del lavado puede ser mayor con los filtros de mangas que con los PE, ya que puede producirse una absorción ulterior en el aglomerado del filtro.

Debido a las temperaturas operativas generalmente bajas de los sistemas de filtro de mangas, generalmente no son la mejor opción para uso con sistemas de SCR, ya que el gas residual tendrá normalmente que recalentarse a alrededor de 350 °C para obtener las mejores eficacias.

Una de las dificultades de los filtros de mangas es que aunque en condiciones normales de funcionamiento las bolsas pueden tener una larga vida (2 – 4 años), si se produce un problema en la planta y se obstruyen o resultan dañados, el coste de la sustitución puede ser alto. Estos tipos de problemas pueden ocurrir, y de hecho ocurren ocasionalmente, por lo que existe el riesgo de costes elevados que no se dan en los precipitadores electrostáticos.

Los tejidos de los filtros son materiales sensibles. Se requiere un procedimiento técnico bien des-

arrollado en combinación con un sistema continuo y fiable de control electrónico para evitar los daños evitables al filtro de tejido.

Si los filtros de mangas están dañados, los niveles de emisiones pueden ser bastante elevados, por lo que es importante incorporar un sistema de detección de fallos de las bolsas. La mejor forma de hacerlo es mediante la medición constante de la composición del polvo.

Ventajas
<ul style="list-style-type: none"> • Eficacias de recogida muy altas. • Recogida del producto en estado seco. • Bajo coste de inversión en las aplicaciones más simples.
Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> • Se genera un volumen de residuos sólidos que no siempre es posible reciclar. • Consumo energético debido a la caída de presión. • A menudo se requiere enfriamiento de los gases. • A veces es necesario el acondicionamiento del tejido. • A veces los tejidos pueden ser caros. • Los requisitos de espacio pueden ser grandes. • Problemas con el punto de rocío debido a la obstrucción del tejido. • El aire de limpieza (flujo inverso) a veces tiene que calentarse. • Algunos tipos de polvo son muy difíciles de desalojar, lo que hace que la caída de presión sea superior al valor diseñado. • Periódicamente se requiere la sustitución de la manga.

Tabla 4.5: Principales ventajas y desventajas de los filtros de mangas

4.4.1.4. Colectores Mecánicos

Este término se utiliza para describir las técnicas que utilizan fuerzas mecánicas (gravedad, inercia, fuerza centrífuga) para separar el polvo de la corriente de gas, esto es:

- ✓ Ciclones: se aplica un movimiento de giro al gas, y el polvo se separa por fuerza centrífuga.
- ✓ Sedimentadores por gravedad: el gas entra en una cámara grande en la que se reduce la velocidad del gas, con lo que el polvo sedimenta.
- ✓ Cámaras con pantallas: las pantallas hacen que el gas cambie de dirección y sedimente el polvo.
- ✓ Celosías: bancos de pequeñas pantallas dividen y cambian la dirección del flujo de gas, haciendo que el polvo sedimente.

Estas técnicas tienen malas eficacias de recogida para partículas pequeñas, y debido al pequeño tamaño de partículas de la mayoría de polvos de la Industria del Vidrio, son raramente utilizadas. La excepción a esto es el ciclón, que puede encontrarse en algunas aplicaciones, particularmente como etapa de pretratamiento para otras técnicas. Los principios operativos y las principales ventajas y desventajas se resumen a continuación. No obstante, dado que no se consideran una técnica efectiva para las emisiones de los hornos, los ciclones no se describen en detalle.

El ciclón es un dispositivo de limpieza de gas del tipo de inercia. El polvo se separa de la corriente de gas cuando cambia la dirección del flujo de gas y el polvo continua en la dirección original en virtud de su inercia, y luego se deposita en una superficie de recogida. Hay dos tipos de ciclones, de flujo inverso y directo. Los ciclones de flujo inverso son los más comunes, y consisten en un cuerpo cilíndrico con una base cónica, una tolva de recogida de polvo, y entradas y salidas de aire. Hay dos tipos de ciclones de flujo inverso, tangenciales y axiales. Estas clasificaciones se derivan de la geometría de la entrada de aire.

La corriente de gas de entrada se canaliza creando un torbellino, y las fuerzas centrípetas sostienen el movimiento circular. Las partículas por encima de un tamaño crítico son lanzadas desde la espiral de

entrada a un recorrido circular más amplio, y se depositan en la pared del ciclón. El flujo de aire lleva el polvo a la tolva de recogida, y en la base del cono el flujo de gas se invierte y el gas limpio pasa de nuevo por el centro del ciclón en la espiral de salida.

En general, la eficacia de un ciclón aumenta para los aumentos correspondientes en: densidad de las partículas, velocidad de entrada, longitud del ciclón, número de revoluciones del gas, relación del diámetro del cuerpo y el diámetro de salida, diámetro de las partículas, cantidad de polvo y la lisura de la pared del ciclón. La eficacia disminuye con el aumento en la viscosidad del gas, la densidad del gas, la temperatura, el diámetro del ciclón, el diámetro de salida del gas, la anchura del conducto de entrada de gas y la superficie de entrada.

Los ciclones se utilizan ampliamente en muchas industrias, y son particularmente adecuados para recoger partículas con diámetros mayores de 10 µm. Según el diseño, los ciclones de eficacia media o alta ofrecen eficacias de recogida de 45 - 90 % a 10 µm y de 5 - 30 % a 1µm. Frecuentemente se sitúan antes de tecnologías más caras, con el fin de eliminar el material grueso de la corriente de gas y con ello reducir la carga de polvo que entra en el equipo de eliminación principal.

Ventajas:

- Bajos costes de inversión y costes operativos (incluido mantenimiento).
- Caída de presión moderada.
- Bajos requisitos de espacio en comparación con otras técnicas.
- Pueden funcionar con grandes cargas de polvo.
- Pueden usarse con una amplia gama de gases y polvos.
- Pueden utilizarse a altas temperaturas y presiones.
- Fabricación posible en una amplia gama de materiales.

Desventajas:

- Baja eficacia de recogida en partículas pequeñas.
- Los materiales ligeros o en forma de aguja son difíciles de eliminar.
- Pueden producirse taponamientos si se encuentran puntos con rocío.
- La reducción de explosiones de sustancias inflamables es difícil.
- Problemas potenciales con polvos abrasivos.

Tabla 4.6: Principales ventajas y desventajas de los ciclones

4.4.1.5. Medios de Filtro a Alta Temperatura

Uno de los problemas con los filtros de mangas convencionales es la necesidad de mantener la temperatura del gas residual dentro del rango operativo del material de filtro. Cuando la temperatura se sitúa por encima del límite superior de temperatura, el filtro debe derivarse o enfriar el gas, por ejemplo mediante dilución. Los materiales de filtro convencionales tienen un límite de temperatura de 120 – 180 °C, con algunos materiales de hasta 250 °C (fibra de vidrio). Los costes de los materiales aumentan significativamente para materiales capaces de funcionar por encima de 180 °C. En algunas aplicaciones se han utilizado medias a alta temperatura, pero estos filtros no son filtros de mangas normales y normalmente son similares a diseños de filtro de bujía.

Los filtros a alta temperatura se han utilizado con éxito para eliminar las emisiones de algunos cubilotes para lana de roca, pero ya no se utilizan debido a su elevado coste. Los filtros más comunes de alta temperatura utilizados en otras industrias son los filtros cerámicos. No obstante, no hay aplicaciones conocidas de esta técnica dentro de la Industria del Vidrio, por lo que actualmente no hay disponible información cuantitativa sobre costes o eficacia medioambiental. Las aplicaciones hasta la fecha han sido generalmente en industrias con volúmenes de gases residuales considerablemente menores que los asociados con la mayoría de hornos.

4.4.1.6. Lavadores Húmedos

Los sistemas de lavado húmedo pueden usarse para controlar las emisiones tanto gaseosas como de partículas. Aunque la tecnología básica es similar para ambos, los criterios de diseño para la eliminación de partículas o gas son muy distintos. No obstante, para mantener bajos los costes de inversión, los sistemas de lavado húmedo se utilizan con frecuencia para controlar emisiones mixtas de partículas y gases. El diseño supone inevitablemente un compromiso, pero puede representar la MTD cuando sistemas de control separados sean prohibitivamente caros. Los sistemas de lavado húmedo pueden también tener tendencia al bloqueo por partículas insolubles, y se genera una lechada residual. La técnica se describe con mayor detalle en la Sección 4.5.6.1.2.

En algunas aplicaciones puede considerarse el uso de lavadores Venturi. Estos sistemas tienen una gran caída de presión y en consecuencia tienen un elevado consumo de energía y altos costes operativos. Aunque pueden obtenerse buenas eficacias de recogida con lavadores Venturi en algunas aplicaciones, la escala de la mayoría de procesos del vidrio implica que la técnica es técnica y económicamente impracticable. No obstante, la técnica puede ser empleada en algunas aplicaciones especializadas a pequeña escala, particularmente si también hay emisiones gaseosas.

Para la mayoría de hornos de vidrio, el lavado húmedo no es probable que sea una técnica útil para la eliminación de partículas.

4.4.1.7. Resumen de las Consideraciones de las Técnicas de la Sección 4.4.1

La reducción de las emisiones de partículas de los hornos de vidrio se considera de alguna manera un aspecto debatible desde un punto de vista tanto técnico como económico. Hay una serie de factores que desempeñan un papel a la hora de determinar la MTD para la eliminación de polvo en los hornos de vidrio, los más importantes son:

- ✓ El impacto medioambiental del polvo.
- ✓ Técnicas de eliminación primaria y secundaria en relación con las MTD.
- ✓ La economía de la escala y consideraciones de coste asociadas.

Impacto medioambiental del polvo

Los aspectos relevantes de las emisiones de polvo desde un punto de vista medioambiental son la emisión de polvo en general, las emisiones potenciales de metales (pesados) y la emisión de partículas finas.

En los vidrios sodocálcicos, el componente principal es el sulfato sódico (hasta un 95%). El sulfato sódico no se considera nocivo en sí, pero como sólido contribuye a la emisión de partículas. Tales emisiones están recibiendo actualmente una atención creciente por parte de los reguladores de las políticas medioambientales, particularmente para partículas con un diámetro de menos de 10 µm, lo que es generalmente el caso para las emisiones de los hornos de vidrio.

En las partículas de los hornos de vidrio pueden también encontrarse varias especies de metales. Los principales componentes que pueden causar preocupación son selenio (Se), plomo (Pb), cobre (Cu), vanadio (V), níquel (Ni), antimonio (Sb), arsénico (As), cadmio (Cd), zinc (Zn) y manganeso (Mn). La emisión de estos componentes depende fuertemente de la cantidad y calidad del vidrio reciclado (vidrio recuperado) utilizado, de si se utiliza fuel-oil, y de la adición de metales a la formulación de la mezcla para la coloración o decoloración del vidrio. La mayoría de estos componentes están predominantemente ligados en las partículas. No obstante, especialmente para selenio, cadmio, plomo y zinc, las emisiones volátiles de estos elementos pueden también ser significativas. En muchos casos, el principal motivo de la instalación de un equipo de eliminación de polvo ha sido la reducción de metales (pesados), tanto volátiles como

incorporados en el polvo. La reducción de las emisiones gaseosas (SO_2 , HCl , etc.) también ha sido el motivo en muchos casos.

Un último punto a considerar es la posible condensación de los componentes gaseosos después de la chimenea, que puede ocurrir, especialmente en los vidrios que contienen boro, en la que una parte de los compuestos gaseosos de boro pueden pasar a través del equipo de eliminación de polvo y condensar tras su emisión a la atmósfera.

Técnicas de eliminación primaria y secundaria en relación con las MTD

Las técnicas de eliminación secundaria mejor establecidas en la industria del vidrio son los filtros de mangas y los precipitadores electrostáticos. Ambas técnicas se utilizan ampliamente, aunque cada una con sus respectivas posibilidades y restricciones. A finales de 1998, aproximadamente el 30% de los hornos de vidrio sodocálcico de la UE y el 100% de algunos Estados Miembros estaban equipados con sistemas de eliminación secundaria para polvo.

Por otra parte, la puesta en práctica de medidas secundarias comporta un coste financiero sustancial, y un cierto grado de coste medioambiental. En general (desde plantas pequeñas de envases hasta grandes plantas de vidrio flotado), los costes de inversión serán del orden de 0,5 – 2,75 millones de euros, con costes operativos de 37.000 a 186.000 euros anuales. Se plantean dudas acerca de si la eliminación secundaria de polvo es necesaria en todos los casos. Evidentemente, los costes de las medidas primarias son mucho menores que para las medidas secundarias, y no se producen residuos ni se consume energía. Estos son buenos motivos para preferir las medidas primarias sobre las secundarias, así como para fomentar el desarrollo de medidas primarias.

La Industria Europea del Vidrio realiza considerables inversiones para comprender el mecanismo existente detrás de la formación de polvo y para el desarrollo de técnicas de eliminación primaria de polvo, pero la experiencia en este campo es todavía escasa. En el momento presente, sólo un pequeño número de plantas de vidrio sodocálcico tienen emisiones de polvo inferiores a 100 mg/ Nm^3 sin el uso de eliminación secundaria, y actualmente se considera que 100 - 200 mg/ Nm^3 (alrededor de 0,3 kg/tonelada de vidrio) es el rango generalmente alcanzable con medidas primarias. Se afirma que a medio plazo son posibles emisiones del orden de 70 - 100 mg/ Nm^3 [tm30 Dust]. El beneficio relativo de ulteriores reducciones en el polvo debe considerarse en el contexto de la protección del medio ambiente en su conjunto.

El aspecto positivo de las técnicas primarias se ve superado en un sentido técnico por la eficacia actual mucho mayor de las técnicas de eliminación secundaria (< 30 mg/ Nm^3 y < 0,1 kg/tonelada de vidrio) y la falta de perspectivas para poder alcanzar valores tan bajos con medidas primarias en el futuro próximo, y en un sentido medioambiental por la necesidad de reducir las emisiones de polvo, especialmente las partículas finas, los componentes ácidos y los metales pesados).

Además, el uso exclusivo de las técnicas primarias para reducir las emisiones de polvo podría limitar la flexibilidad de las condiciones operativas del horno, en términos de la calidad de los materiales de alimentación (bajas impurezas: fluoruros, cloruros, metales pesados), tipo de combustible (bajo nivel de azufre y metales pesados), cambios de producción (vidrios coloreados o incoloros).

En años venideros, la Industria del Vidrio seguirá explorando y desarrollando el potencial de las medidas primarias para reducir las emisiones de los hornos de vidrio. Debido a la falta de predicciones sólidas, no es posible anticipar acontecimientos. Por consiguiente, la decisión de la MTD para eliminación de polvo debe basarse en el conocimiento disponible en la actualidad.

Economía de escala y consideraciones de costes asociadas

La definición de “técnica disponible” en la Directiva 96/61/CE requiere desarrollar una técnica a una escala que permita su puesta en práctica en el sector industrial relevante, en condiciones económicas y técnicamente viables, teniendo en consideración los costes y las ventajas, y que sea razonablemente accesible.

En general, las técnicas de eliminación secundaria de polvo en la Industria del Vidrio se consideran accesibles, técnicamente viables y, en la inmensa mayoría de casos, económicamente viables.

No obstante, al igual que en cualquier técnica secundaria, la economía de escala es un aspecto importante. Significa que, para hornos pequeños, los costes relativos (costes por Nm³ de gas de combustión tratado) son generalmente mayores que para los hornos grandes. Los costes dependen de la aplicación y particularmente del volumen de gas residual. La economía de escala debe tenerse en consideración al determinar la MTD a nivel general. Aparte de la economía de escala, las consideraciones de costes globales de la eliminación de polvo deben incluir asimismo las ventajas medioambientales: eliminación de partículas finas, metálicas (si los hay) y lavado de gases ácidos (si los hay), así como los inconvenientes derivados de la producción de residuos (si no es posible su reciclaje) y del consumo de energía.

4.4.2. Óxidos de Nitrógeno (NOx)

El término óxidos de nitrógeno (NOx) incluye el óxido nítrico (NO) y el dióxido de nitrógeno (NO₂) expresados en forma de equivalente de NO₂. El óxido nitroso (N₂O) no es un contaminante normal en la Industria del Vidrio, por lo que no se incluye en el término NOx. Las tres principales fuentes de emisiones de NOx de las actividades de fusión de vidrio son las materias primas, el combustible y el NOx térmico. Hay una cuarta vía, el NOx puntual (de la reacción del nitrógeno mediante una ruta compleja con radicales de hidrocarburos de corta vida), que es relativamente insignificante.

Cuando haya nitratos presentes en las materias primas de la mezcla, se emitirá NOx al fundirse las materias. En general, la mayor parte del componente de nitrógeno se emite como NOx y no se incorpora al vidrio. Por ejemplo, cuando se funde NaNO₃, el componente del sodio se incorpora al vidrio como Na₂O, y el resto del compuesto se emite en forma de gases (NOx, O₂ y N₂).

El NO del combustible se deriva de la oxidación del nitrógeno y de los compuestos de nitrógeno presentes en el combustible, pero su contribución global es baja en comparación con el NOx térmico. Con la combustión a gas natural, el NO del combustible es efectivamente cero.

Debido a las elevadas temperaturas en los hornos de vidrio (hasta 1.650 °C y 2.000 °C en la llama), la principal fuente de NOx es el NOx generado térmicamente, que se deriva de la oxidación del nitrógeno en la atmósfera de combustión a temperaturas de más de 1300 °C. Las principales fuentes de nitrógeno son el aire de combustión, el aire de atomización (en los hornos con combustión de fuel-oil), y el aire que entra en el horno. El compuesto predominante es NO (90 - 95 %), formado por la reacción N₂ + O₂ → 2 NO. Los niveles de NO₂ son muy bajos, y la mayor parte del NO₂ detectado en las emisiones proviene de la oxidación atmosférica del NO. Las condiciones en el horno son tales que el óxido de nitroso (N₂O) no se detecta en las emisiones.

En los hornos calentados eléctricamente, el NOx proviene únicamente de la descomposición del material de la mezcla. En los cubilotes de lana de roca hay una atmósfera global reductora y las emisiones de NOx son generalmente muy bajas. Pueden producirse emisiones si se instala un sistema de postcombustión. La finalidad de este sistema es oxidar el monóxido de carbono y el sulfuro de hidrógeno.

En los hornos de combustibles fósiles, a igualdad de todos los demás factores, las emisiones de NOx térmico se reducen si se reduce el consumo de combustible. Por consiguiente, las técnicas que mejoran la eficiencia energética producen generalmente menores emisiones globales de NOx en términos de kg NOx / tonelada de vidrio fundido. No obstante, la concentración de las emisiones no siempre se reduce, particularmente si los volúmenes de gas residual son también menores. La reducción en NOx térmico es resultado de una combinación de factores, pero principalmente de las temperaturas más bajas y de los niveles reducidos de aire de combustión. En la Sección 4.8 se describen técnicas que reducen las emisiones de NOx pero cuya principal finalidad es reducir el consumo de energía, y que no se tratan aquí.

4.4.2.1. Modificaciones de la Combustión

Descripción de las técnicas

La formación de NOx térmico se describe cualitativamente en la fórmula siguiente, en la que A y B son constantes, T es la temperatura de la llama y t es el tiempo de estancia a la temperatura T . Para gases, las relaciones hacen referencia a concentraciones.

$$\text{NOx} = A \times \exp(-B/T) \times N_2 \times (O_2)^{0.5} \times t$$

Por consiguiente los principales factores que influyen en la formación de NOx son la temperatura de la llama, el contenido de oxígeno en la zona de reacción y el tiempo de estancia en la zona de alta temperatura de la llama. Las medidas de control primario de NOx buscan generar las condiciones menos favorables para la formación de NOx, es decir, evitar la presencia simultánea de nitrógeno y oxígeno a alta temperatura. Las principales técnicas para minimizar el NOx térmico se resumen a continuación.

Relación reducida de aire / combustible

La entrada de aire en el horno, particularmente alrededor de las boquillas de los quemadores y a través del alimentador de mezclas, puede conducir a un aumento en los niveles de NOx. El bloque de quemadores es relativamente fácil de sellar, y pueden tomarse medidas para evitar la entrada de aire en la zona de alimentación de mezclas. Estas medidas son relativamente baratas y bastante eficaces. La reducción de NOx depende obviamente del nivel inicial, pero puede ser de hasta un 10%.

Generalmente, los hornos operan con un exceso de aire del 5 - 10 % (es decir, 1 - 2 % de exceso de oxígeno) para asegurar una combustión completa. Reduciendo la relación de aire / combustible a niveles casi estequiométricos pueden conseguirse reducciones significativas de NOx, y la técnica puede también producir considerables ahorros de energía. Para aplicar la técnica efectivamente, será necesario medir los niveles de NO, CO y O₂ en el gas residual. Si la combustión es subestequiométrica, los niveles de monóxido de carbono y el desgaste del material refractario pueden aumentar, y puede alterarse el nivel redox del vidrio, afectando a su calidad.

Este tipo de cambio debe realizarse con cuidado y de forma progresiva para evitar problemas y conseguir los mejores resultados. En algunos casos (Ej. hornos de recuperación), si se considera la estequiometría del horno en conjunto, algunas posiciones de quemadores pueden quemar con exceso de combustible en las partes más calientes del horno, y otras con un ligero exceso de aire en las partes más frías. Globalmente, la relación será casi estequiométrica. Según la posición inicial, pueden conseguirse reducciones en las emisiones de hasta un 40% utilizando estas técnicas.

Los niveles de aire en el horno pueden reducirse ulteriormente utilizando gas natural, alta presión o vapor como alternativa al aire para la atomización del combustible. Esto reduce los niveles de oxígeno y por consiguiente las temperaturas máximas de las llamas. Los resultados con esta técnica han sido diversos, observándose un beneficio muy pequeño en algunas aplicaciones.

Reducción de la temperatura del aire de combustión

La temperatura de la llama puede reducirse reduciendo la temperatura de precalentamiento del aire de combustión. Por ejemplo, las temperaturas del aire de combustión en los hornos de recuperación son considerablemente menores que en los hornos regenerativos, lo que produce menores temperaturas de llama y menores concentraciones de NOx. No obstante, la menor temperatura de precalentamiento tiene como consecuencia una menor eficacia del horno (menor productividad específica), una menor eficacia del combustible (por lo tanto, una mayor demanda de combustible) y potencialmente mayores emisiones (kg/tonelada de vidrio) de NOx, CO₂, óxidos de azufre, partículas, etc. Así, en conjunto, es improbable que esta técnica sea beneficiosa medioambientalmente.

Combustión por etapas

Si el combustible y el aire / oxígeno se inyectan en el mismo lugar del quemador, se produce una llama con una zona primaria oxidante caliente cerca de la toma, y una zona secundaria más fría más adelante. La mayoría del NOx se produce en la zona más caliente. Por consiguiente, reduciendo la proporción de aire o el combustible inyectado en el quemador se reducen la temperatura máxima y la formación de NOx. El combustible o aire restante se agregan posteriormente en la zona de combustión.

La combustión por etapas de aire comporta una combustión subestequiométrica y agregar luego el aire o el oxígeno restante en el horno hasta la combustión completa. Hay varias formas de conseguir la combustión por etapas de aire u oxígeno. Las primeras experiencias con etapas de aire caliente han sido problemáticas. Las técnicas de etapas de inyección de aire (BAS) y de etapas de aire enriquecido con oxígeno (OEAS) están siendo desarrolladas actualmente en EE.UU. por la empresa Combustión Tec. Hay unos 10 hornos equipados con este sistema y se afirma que los resultados son una reducción de NOx de hasta el 70%.

Las etapas de fuel se basan en el siguiente principio: En el cuello de la toma del inyector se desarrolla una llama de gas de bajo impulso (alrededor del 10% de la energía total). Esta llama secundaria sobre la raíz de la llama primaria reduce el contenido de oxígeno de la llama primaria y la temperatura de su núcleo.

Por consiguiente, se reduce la formación de NOx. Esta técnica ha tenido más éxito que la de etapas de aire y se utiliza bastante ampliamente. Con esta técnica pueden obtenerse reducciones de las emisiones de hasta un 35%.

Recirculación de los gases de combustión

El gas residual del horno puede reinyectarse en la llama para reducir el contenido de oxígeno y por consiguiente la temperatura y la eficacia de formación de NOx. Ha habido dificultades en la aplicación de esta técnica en la Industria del Vidrio a plena escala de producción, y actualmente se considera en desuso. En el momento presente, esta técnica no se considera técnicamente probada en esta aplicación.

Quemadores bajos en NOx

Se trata de un término utilizado para cubrir una serie de sistemas de quemadores patentados o desarrollados por empresas del vidrio, diseñados para minimizar la formación de NOx. Estos sistemas pueden variar en cuanto a su principio y pueden incorporar una serie de características, incluidas algunas de las arriba descritas y otras indicadas a continuación. Con estos sistemas optimizados pueden conseguirse reducciones de las emisiones de alrededor del 30%. Los sistemas de combustión a gas difieren en algunas cosas de los de combustión a fuel-oil. Las principales características de los sistemas de quemadores bajos en NOx son:

- ✓ Mezcla más lenta del combustible y el aire para reducir las temperaturas máximas de las llamas (modelado de llamas).
- ✓ Velocidades de inyección mínimas que permitan una combustión completa.
- ✓ Llamas con mayor emisividad, por ejemplo, promoviendo la escisión térmica de los combustibles gaseosos para conseguir una mejor emisividad y con ello temperaturas de llama globalmente más bajas.

Elección de combustible

La experiencia general dentro de la Industria del Vidrio es que los hornos de combustión a gas producen mayores emisiones que los hornos de combustión a fuel-oil. Por ejemplo, para un horno de vidrio flotado con un funcionamiento normal, en la Sección 3.4.2.2 se indican concentraciones de NOx de 2500

mg/Nm³ para combustión a gas y de 1.800 mg/Nm³ para combustión a fuel-oil. Las diferencias varían ampliamente según el tipo de horno y la aplicación, pero una variación del 25 - 40 % es frecuente.

El principal motivo de esto es que las llamas de gas tienen una menor emisividad térmica que las llamas de fuel-oil, lo que requiere una mayor temperatura de llama para permitir la misma transferencia de calor al vidrio fundido y con ello condiciones más favorables para la formación de NOx. No obstante, a medida que la industria ha desarrollado más experiencia con la combustión a gas y han cambiado los diseños de los hornos, las diferencias en las emisiones de NOx y los requisitos de combustible para ambos combustibles se han reducido. En algunas aplicaciones (Ej. vidrio para envases), se han obtenido eficacias del combustible y emisiones de NOx que se acercan progresivamente a las asociadas con la combustión a fuel-oil, mediante un ajuste adecuado de la llama en combustión a gas. El contenido en nitrógeno del gas natural es generalmente despreciable, pero puede variar de una región a otra, con el consiguiente efecto sobre el NOx.

Eficacia Medioambiental

En la descripción de cada técnica se indican las reducciones de las emisiones que pueden conseguirse utilizando dichas técnicas. Los efectos de estas técnicas no son acumulativos, ya que generalmente se trata de distintos modos de alcanzar los mismos objetivos generales. Por consiguiente, una reducción del 10% producida por una técnica no puede simplemente añadirse a un 10% de otra técnica. Las reducciones globales de las emisiones para sistemas de combustión optimizados varían ampliamente, desde menos de un 10% a más de un 70%. Para un horno en el que se haya realizado poco o ningún trabajo con estas técnicas, cabe esperar reducciones en las emisiones de NOx del 40 – 60% en la mayoría de aplicaciones.

Los niveles de emisiones actuales alcanzables con estas técnicas varían considerablemente según el punto de inicio, la edad y el diseño del horno, y particularmente según el rigor con que se apliquen y controlen. Puede conseguirse mucho con medidas relativamente simples si se aplican adecuadamente. La Industria del Vidrio ha realizado progresos sustanciales durante los años 90 y se han dedicado gran cantidad de recursos al trabajo.

Los hornos regenerativos de llama de bucle tienen por lo general menores emisiones de NOx que los hornos regenerativos de llama transversal (ver Sección 4.2), y las técnicas descritas en esta sección son generalmente más eficaces para hornos de llama transversal. Para hornos de llama de bucle se han alcanzado 650 - 800 mg/Nm³ y menos de 1,5 kg/tonelada de vidrio. Para determinadas aplicaciones se han reportado un número restringido de cifras por debajo de estos niveles.

Los resultados en los hornos de recuperación son más variados, pero esto puede ser debido al uso más variable de estos hornos. Se han conseguido resultados comparables (y a veces inferiores) a los de los hornos regenerativos con hornos de recuperación de vidrio para envases y de fibra de vidrio de filamentos continuos, pero el éxito alcanzado ha sido menor en la producción de lana de vidrio.

Consideraciones Económicas

Los costes de las modificaciones en la combustión son relativamente bajos y a veces pueden compensarse mediante los menores costes operativos derivados de los ahorros de energía. Los sistemas de quemadores bajos en NOx cuestan entre 100.000 y 550.000 euros por horno según su tamaño y tipo, y pueden añadirse de 65.000 a 90.000 euros más en sistemas de medición y control. Los costes de los quemadores representan los costes de sustitución, no los costes adicionales, por lo que para un horno nuevo los costes adicionales serían muy bajos. Los sistemas de combustión por etapas de aire pueden ser considerablemente más caros.

Estas técnicas primarias, combinadas con la optimización de la formulación, son en general mucho más baratas que las técnicas de eliminación secundarias. En la sección 4.2.2.9 se discuten los costes comparativos.

Aplicabilidad

En principio (y con arreglo a las limitaciones arriba indicadas), estas técnicas son aplicables a todos los hornos convencionales de combustibles fósiles. La mayoría de las técnicas pueden aplicarse a hornos existentes y nuevos. No obstante, los beneficios de algunas técnicas (Ej. quemadores bajos en NOx) sólo pueden conseguirse plenamente cuando se combinan con un óptimo diseño del horno y de su geometría, lo que sólo es posible con un horno nuevo o con una reconstrucción.

El éxito obtenido con estas técnicas puede también depender del grado de experiencia y de los recursos científicos del fabricante. La optimización de los sistemas requiere un periodo sostenido de experimentación gradual y control, así como un alto grado de pericia y experiencia técnica. Para las empresas que no poseen estos recursos, existen asesores especializados que ofrecen servicios para realizar modificaciones y optimizar la combustión de los hornos. Este trabajo de desarrollo, por supuesto, incrementa el coste de las técnicas.

El grado en que pueden aplicarse estas técnicas variará en función de los requisitos del producto y del proceso. Por ejemplo, en determinadas producciones de vidrio doméstico, las restricciones de calidad de los productos exigen un vidrio altamente oxidado y muy transparente. Esto comporta tiempos de estancia largos, temperaturas más elevadas, y el uso de agentes oxidantes, todo lo cual contribuye a aumentar las emisiones de NOx y limita el uso de algunas de las técnicas anteriormente descritas. Este ejemplo se describe con más detalle en la Sección 4.4.2.2 siguiente.

Consideraciones Asociadas

Ventajas:

- Bajos costes relativos.
- Se consiguen reducciones sustanciales en las emisiones de NOx para la mayoría de tipo de hornos.
- Aplicables a hornos nuevos y existentes.
- Estas técnicas no tienen ningún aspecto medioambiental negativo significativo y pueden producir a menudo un ahorro significativo de energía.
- Las menores temperaturas del horno y el menor consumo energético tienen asimismo como consecuencia menores emisiones globales.

Desventajas:

- Se requiere una pericia sustancial para obtener los mejores resultados.
- Puede ser necesario modificar el diseño del horno para obtener los mejores resultados.
- Debe tenerse cuidado en evitar problemas de calidad del vidrio debidos a cambios redox.
- Deben controlarse los niveles de CO para evitar daños en el material refractario.
- La atmósfera más reductora puede fomentar las emisiones SO₂.

Tabla 4.7: Principales ventajas y desventajas de las modificaciones de la combustión

4.4.2.2. Formulación de la Mezcla

Los nitratos se utilizan en la fabricación de vidrio como agentes oxidantes y también como agentes de afino. El nitrato más comúnmente usado es con mucha diferencia el nitrato sódico, pero en algunas aplicaciones de vidrio especial también se utiliza nitrato potásico o bárico. Aunque el nitrato sódico actúa como agente de afino, su uso principal es como agente oxidante, y en la mayoría de aplicaciones el sulfato sódico sería el agente de afino preferido. Durante el proceso de fusión, los nitratos se disocian para formar NO, NO₂, N₂, y O₂. El O₂ se utiliza para oxidar el material fundido (particularmente el hierro Fe²⁺ a Fe³⁺) para dar un vidrio muy transparente, y para oxidar los compuestos orgánicos que pueda haber en las materias primas de la mezcla.

El uso de nitratos varía ampliamente entre los distintos sectores de la Industria del Vidrio. Raramente se utilizan en el vidrio plano o para envases, excepto para producir algunos productos de muy alta calidad y muy incoloros, o vidrio altamente coloreado, como vidrio gris o bronceado. Los nitratos se utilizan

en el sector de Vidrio Doméstico para algunos productos de alta calidad, que requieren una elevada claridad óptica y por tanto bajos niveles de Fe²⁺. Los nitratos se utilizan ampliamente en el sector de vidrio especial para vidrio de TV, vidrio de borosilicato, vitrocerámicas y vidrios ópticos. Los hornos eléctricos que producen vidrios muy oxidados, o en los que se funden materias primas que contengan compuestos orgánicos (Ej. residuos de lana de vidrio) pueden también requerir el uso de nitratos como agentes oxidantes. En total, se estima que un 7 – 9 % de la producción de vidrio de la UE comporta el uso de cantidades significativas de nitratos.

Las cantidades típicas introducidas son de alrededor de 0,5 - 1 % de nitrato, es decir 5 - 10 kg de NaNO₃ por tonelada de vidrio. Para algunos procesos, como el vidrio para TV, el porcentaje puede ser de hasta el 4% o incluso superior. Durante la fusión, los principales gases emitidos son NO y O₂, con niveles sólo bajos de N₂ y NO₂. Para un 1% de nitrato introducido en la mezcla, la emisión máxima de NOx es de 5,4 kg/tonelada de vidrio. Este valor es equivalente a unos 2.700 mg/Nm³ a 8 % O₂. La emisión real de NOx de los nitratos varía entre un 30% y un 80% de este máximo, con un valor típico en condiciones industriales de alrededor del 50 - 65 % (aunque frecuentemente se encuentra todo el rango de valores).

La cantidad de NO emitido de los nitratos depende de la velocidad de calentamiento, del estado redox de la mezcla y del efecto de los gases reductores (llamas reductoras) que entran en contacto con la capa exterior de la mezcla que contiene el nitrato.

Las alternativas efectivas a los nitratos están limitadas por consideraciones medioambientales y económicas. Por ejemplo, pueden usarse sulfatos, pero la cantidad requerida es mucho mayor, más de tres veces, y se emite SO₂. También pueden usarse óxidos de arsénico, aunque están siendo suprimidos cuando es practicable por motivos medioambientales. En algunos casos puede usarse óxido de cerio, aunque muchas veces es más caro que el nitrato sódico. Algunas modificaciones de procesos pueden también reducir los requisitos de nitrato, pero son generalmente prohibitivas debido a consideraciones de calidad, requisitos energéticos, restricciones de productividad o generación de NOx térmico.

En conclusión, la opinión actual dentro de la industria es que los niveles de nitratos pueden reducirse mediante experimentación hasta el mínimo compatible con los requisitos de los productos y de fusión, aunque por motivos económicos y medioambientales actualmente no hay disponible alternativa eficaz.

En muchos Estados Miembros, la legislación ha permitido doblar el límite de emisión normal de NOx para vidrios que requieran la adición de nitratos. Este enfoque no se considera generalmente que sea compatible con los objetivos de la Directiva 96/61/CE. No deja margen para la amplia variación en los niveles de adición de nitratos y proporciona poco incentivo para minimizar el uso de nitratos. Además, para procesos que agregan sólo pequeñas cantidades de nitratos, doblar el límite de emisiones puede enmascarar niveles elevados de emisiones de NOx térmico, lo que podría reducir el incentivo para optimizar las condiciones de combustión.

La adición de nitratos no puede considerarse como una característica aislada del proceso de fusión. En general, los vidrios que requieren nitratos tienen asimismo otras restricciones específicas ligadas a su uso. Por ejemplo, el proceso de fusión para vajillas de vidrio sodocálcico o para envases de lujo se diferencia de la producción de vidrio para envases no sólo en el uso de nitratos, sino también en el tiempo de estancia en el horno (al menos un 50% más largo); en el requisito de condiciones mucho más oxidantes en el material fundido y en el horno; y en temperaturas más elevadas del vidrio (entre 50 °C y 1000 °C más altas). Todos estos aspectos contribuyen a mayores emisiones de NOx por unidad de producción de vidrio, y pueden ser hasta 2 ó 3 veces mayores que en los hornos regenerativos de llama de bucle de vidrio para envases.

Los costes de los métodos para reducir la adición de nitratos y los niveles de emisiones que pueden conseguirse son muy difíciles de cuantificar, ya que dependen en gran medida del punto de partida y son muy específicos de cada caso.

4.4.2.3. Diseños Especiales de Hornos

La preocupación por las emisiones de NOx ha llevado a algunos diseñadores de hornos a proponer hornos de tipo recuperativo que integran diversas características previstas para permitir menores temperaturas de llama y con ello menores niveles de NOx. El mejor conocido de este tipo de horno es el horno de fusión Sorg LoNOx® (bajo en NOx). Otro diseño de Sorg es el horno de fusión flexible Flex® Melter, que generalmente está previsto para uso en aplicaciones discontinuas y se considera que tiene emisiones de NOx comparables al horno de fusión Sorg LoNOx®. En el Capítulo 2 se incluye una breve descripción del horno de fusión Flex® Melter, pero aquí sólo se discute en detalle el horno de fusión Sorg LoNOx®.

Descripción de la Técnica

[Sorg LoNOx], [tm19 5yrs LoNOx]

El horno de fusión Sorg LoNOx® utiliza una combinación de afinado en baño poco profundo y de precalentamiento de las materias primas para conseguir niveles de NOx reducidos, potencialmente sin la penalización de una menor eficacia térmica. El afinador de baño poco profundo obliga a que el importante camino de la corriente crítica pase cerca de la superficie del baño de vidrio, reduciendo con ello el diferencial de temperatura entre el mismo y la superestructura del horno. El horno puede utilizarse a temperaturas más bajas que un horno convencional comparable.

El precalentamiento del aire de combustión es recuperativo, y se utiliza un precalentamiento de materias primas en dos etapas para compensar la reducción en el precalentamiento del aire de combustión en comparación con un horno regenerativo. Los gases residuales de los quemadores principales se hacen pasar sobre las materias primas que entran en el horno, en una amplia zona de prefusión, antes de entrar en los recuperadores. Al salir de los recuperadores, los gases residuales se pasan a través de un precalentador de casco de vidrio externo, antes de abandonar el sistema.

El horno de fusión Sorg LoNOx® es básicamente largo y estrecho, y está dividido en tres partes. La primera parte se utiliza para precalentar, y luego profundizar la mezcla y el vidrio recuperado. A continuación se encuentra la zona de afino, en la que la profundidad del baño de vidrio se reduce a 400 mm (o menos). La cuba se completa con un afinador profundo.

El calentamiento principal es aportado por quemadores a gas o fuel-oil en la zona de fusión. Los gases residuales salen por encima de la parte superior de la mezcla y del vidrio recuperado en la primera parte del horno. El horno está dividido por paredes internas para asegurar que las materias primas que entran en el horno no sean calentadas directamente por la radiación de las partes más calientes del horno. Por consiguiente, se mantiene un elevado diferencial de temperatura entre las materias primas y los gases y se consigue una transferencia eficaz de calor. Puede aplicarse una pequeña cantidad de refuerzo eléctrico para ayudar a mantener las corrientes de convección en la zona de precalentamiento. Este efecto se ve facilitado por borboteadores instalados cerca del final de la zona de fusión.

El precalentador de vidrio recuperado externo está situado tras el recuperador y es parte importante del horno de fusión LoNOx®. Se trata de un sistema de calentamiento directo, en el que los gases residuales calientes y el vidrio recuperado a calentar están en contacto entre sí. El vidrio recuperado y el gas residual fluyen a contracorriente. El vidrio recuperado entra por la parte superior de la torre y va bajando lentamente hasta la salida; los gases residuales entran por la parte inferior y son expulsados arriba. El precalentador tiene aletas internas tipo persiana, que distribuyen los gases residuales de forma más uniforme por la columna de vidrio recuperado. El tiempo de estancia del vidrio recuperado en el precalentador es de unas cinco horas. Los gases residuales entran en el precalentador a una temperatura típica de 500 °C, y salen a unos 200 °C. La temperatura de precalentamiento del vidrio residual es normalmente de 400 °C.

Eficacia Medioambiental

Debido a las bajas temperaturas operativas, se han conseguido niveles de NOx bastante bajos. En [Sorg LoNOx] se reportan emisiones continuas de 420 - 440 mg/Nm³, lo que equivale a menos de 1 kg de

NOx por tonelada de vidrio fundido. Son posibles menores emisiones con una mayor experiencia operativa y la aplicación de técnicas de optimización de la combustión.

Consideraciones Económicas

En [tm6 NOxInd.duVerre] se estima que, para un horno de vidrio para envases de 350 toneladas/día, los costes operativos adicionales de esta técnica son despreciables, pero el coste de inversión adicional puede ser del orden de 1,8 millones de euros. Actualmente no hay más información disponible.

Aplicabilidad

La técnica se basa en un precalentamiento significativo de las materias primas, que es difícil de conseguir sin altos niveles de vidrio recuperado. Estos hornos son sólo viables si se utilizan altos niveles de vidrio recuperado, es decir, de más del 70%. Por consiguiente, en el momento presente, esto implica que la técnica es sólo aplicable al Sector de Vidrio para envases y a hornos con >70% de vidrio recuperado. Esta técnica sólo puede aplicarse en una reconstrucción total. Las dimensiones de la cuba (larga y estrecha) pueden también limitar su aplicabilidad cuando haya restricciones de espacio.

Consideraciones Asociadas

La técnica puede conseguir buenas eficacias de fusión, se han reportado cifras de aproximadamente 3,3 GJ/tonelada de vidrio fundido [tm19 5yrs LoNOx] para un índice de vidrio de desecho del 90 – 95% y un refuerzo eléctrico del 3%. Esta cifra se compara favorablemente con los hornos regenerativos modernos.

Debido a las bajas profundidades de vidrio, una característica inherente del diseño es que se trata de un horno largo y estrecho, por lo que la superficie del horno puede ser considerablemente mayor que en un diseño convencional, para un ritmo de producción determinado. Esto aumenta los requisitos de espacio y puede aumentar los costes de inversión del horno.

En la producción de vidrio para envases, puede ser difícil producir vidrio ámbar con altos niveles de vidrio recuperado mixto. Debido en parte a la baja profundidad del vidrio, esta técnica es relativamente eficaz a este respecto, y se ha producido vidrio ámbar con un 95% de casco de vidrio, con grandes cantidades de vidrio recuperado de colores mixtos.

Al igual que en todos los sistemas de precalentamiento de vidrio recuperado, existe el potencial de emisiones de compuestos orgánicos, incluidas sustancias olorosas y posiblemente dioxinas / furanos. Las mediciones han mostrado que las emisiones de dioxinas están por debajo de 0.1 ng/Nm³ TEQ. Estos aspectos se discuten con más detalle en la Sección 4.8.

Instalaciones de Ejemplo

Gerresheimer Glas, Budenheim, Alemania – Vidrio para envases.

Wiegand & Söhne, Steinbach am Wald, Alemania – Vidrio para envases.

4.4.2.4. El proceso FENIX

Descripción de la Técnica

El proceso FENIX se basa en la combinación de una serie de medidas primarias para la optimización de la combustión y la reducción del consumo de energía. En común con las técnicas descritas en la Sección 4.4.2.1, la optimización de la combustión para el proceso FENIX hace referencia a:

- ✓ La reducción del exceso de aire sin originar problemas de calidad del vidrio o emisiones de monóxido de carbono;
- ✓ La supresión de puntos calientes y la homogeneización de las temperaturas de llama; y

✓ La mezcla controlada del combustible y del aire de combustión.

No obstante, el proceso FENIX comporta asimismo una modificación completa del sistema de combustión, y particularmente el uso de un nuevo tipo de inyectores. Estas modificaciones están sujetas a una solicitud de patente. La técnica incluye asimismo una revisión del sistema de control del horno y la instalación de métodos de medición de determinados parámetros del horno. En particular, se instalan sondas de oxígeno encima de las cámaras de los regeneradores para permitir un mejor control de los niveles de exceso de aire.

Las principales características de las modificaciones del sistema de combustión se describen en la solicitud de patente [tm36 FENIXpat], y se resumen a continuación.

Los picos de temperatura están limitados por el mantenimiento de la longitud de la llama mientras se aumenta el volumen de la llama. Las etapas de combustión se consiguen mediante el control del suministro de combustible y oxidando para escalar el contacto o aumentar el volumen de la llama. En el nivel más caliente del horno puede usarse una llama de oxígeno al 100%. El escalonamiento del contacto se obtiene asimismo en parte mediante el uso de un gas inerte “amortiguador” en al menos un inyector. El gas inerte puede también ser CO₂ o gas de combustión reciclado y se inyecta entre los suministros de combustible principal y de oxidante. Esto empuja el desarrollo de la llama hacia el centro del horno y promueve una llama más amplia y uniforme con un mayor volumen.

El contacto entre el oxidante y el combustible puede también retardarse mediante inyectores secundarios de combustible en la zona de la abertura de entrada de aire situada sobre los inyectores del suministro principal de combustible. La técnica puede también incluir el uso de inyectores de aire o lanzas de oxígeno en diversos puntos para mantener una atmósfera oxidante sobre el vidrio sin un exceso global de aire. Estos dispositivos pueden también usarse para ayudar a controlar la combustión. Un aspecto muy importante de la técnica es el diseño del quemador, cuyos detalles se consideran confidenciales.

Eficacia Medioambiental

El proceso FENIX es una técnica relativamente nueva y sólo ha sido desarrollada totalmente en un horno, la línea de vidrio flotado de Saint-Gobain en Aniche, Francia. En [tm24 FENIX] se reportan resultados de esta planta. La concentración de NOx se ha reducido desde 1600 mg/Nm³ a 580 mg/Nm³, una reducción del 63 %. La masa de NOx por tonelada de vidrio fundido se ha reducido desde 4 kg/tonelada a 1,25 kg/tonelada, una reducción del 68 %. La puesta en práctica de la técnica produjo asimismo un ahorro de energía de alrededor del 6 % (desde 5,76GJ/tonelada hasta 5,4 GJ/ tonelada con un 21 % de vidrio recuperado).

Tras la publicación de [tm24 FENIX], se ha confirmado que en la planta de Aniche se obtienen niveles de emisiones de NOx de 510 mg/Nm³ y 1,1kg/tonelada de vidrio fundido.

Consideraciones Económicas

Gracias al ahorro de energía obtenido, la técnica permite de hecho un ahorro global de costes. No obstante, hay una inversión inicial, pero la amortización de la inversión es bastante corta, normalmente de menos de dos años. Los costes de inversión incluyen los nuevos quemadores y los sistemas de control mejorados (unos 700.000 Euros). Para una planta nueva o una reconstrucción que requiera quemadores nuevos y un sistema de control nuevo, los costes adicionales serían muy bajos. También debería tenerse en cuenta los costes de licencias y el tiempo y la capacidad requerida para la puesta en práctica de la técnica.

Aplicabilidad

En el momento presente, la técnica sólo ha sido aplicada a un horno de vidrio flotado regenerativo de llama transversal (600 toneladas/día) que utilizaba fuel-oil pesado con un contenido en azufre inferior al 1%. No obstante, los creadores de esta técnica señalan que en principio puede aplicarse a cualquier horno de llama transversal, aunque es necesario efectuar modificaciones para combustión a gas.

La técnica está actualmente en fase de aplicación a otros hornos del grupo, incluido un horno de combustión a gas. Para cada horno, la técnica requiere una aplicación cuidadosa por parte de un equipo especializado. Saint-Gobain ha indicado que está dispuesto a conceder licencias no exclusivas de la tecnología FENIX a otros fabricantes de vidrio, siempre que pueda alcanzarse un acuerdo sobre las condiciones de dicha licencia.

Consideraciones Asociadas

En el momento presente, esta técnica sólo ha sido aplicada a un proceso, aunque parece que es más ampliamente aplicable y que podría considerarse como técnicamente probada. No obstante, al igual que con todas las medidas primarias, los resultados pueden variar de una aplicación a otra. No puede suponerse automáticamente que los resultados obtenidos en Aniche puedan obtenerse en todos los casos. Cabe esperar que los resultados en otras aplicaciones sean comparables, pero pueden ser mejores o peores en función de circunstancias locales.

El principal aspecto en relación con esta técnica es si puede considerarse disponible y accesible para todos los procesos en los que podría ser aplicable. La puesta en práctica de la técnica es un proceso especializado y lento. Saint-Gobain ha indicado su disposición a conceder licencias para el uso de la tecnología, pero todavía subyace la cuestión de si la capacidad técnica existente es suficiente para permitir la aplicación general de la técnica a medio plazo.

Instalaciones de Ejemplo

Saint-Gobain Vitrage, Aniche, Francia – Vidrio flotado.

4.4.2.5. Fusión con Oxicombustión

Descripción de la Técnica

La fusión con oxicombustión comporta la sustitución del aire de combustión por oxígeno (pureza >90%). La técnica puede utilizarse con gas natural o fuel-oil como combustible, aunque lo más frecuente es el uso de gas. La eliminación de la mayor parte del nitrógeno de la atmósfera de combustión reduce el volumen de los gases residuales (compuestos principalmente de CO₂ y vapor de agua) en un 70 - 85% según la pureza del oxígeno. En general, los hornos de oxicombustión tienen el mismo diseño básico que los hornos de fusión recuperativos, con quemadores laterales múltiples y un solo pórtico de escape de gases residuales. En la mayoría de hornos modernos, la geometría está optimizada para combustión de oxicombustión y minimización de NOx. Los hornos diseñados para combustión de oxígeno no utilizan actualmente sistemas de recuperación de calor para precalentar el suministro de oxígeno a los quemadores, debido a cuestiones de seguridad.

La técnica tiene el potencial de producir considerables ahorros de energía, dado que no es necesario calentar el nitrógeno atmosférico a la temperatura de las llamas. Debe calentarse menos gas y por consiguiente se pierde menos energía del horno. El alcance de los ahorros de energía depende en gran medida del horno con que se compare. Este tema complejo se discute más adelante en esta sección.

La formación de NOx térmico se reduce muchísimo, ya que la principal fuente de nitrógeno es mucho menor, aunque sigue habiendo algo de nitrógeno en la atmósfera de combustión. Procede del nitrógeno residual presente en el oxígeno (VSA/PSA 4 - 6 %, criogénico <0,5 %), del nitrógeno en el combustible (gas natural 2 – 15%), del nitrógeno de la descomposición de nitratos, y del aire parásito que pueda haber. Debido a las altas temperaturas de llama, cualquier N₂ presente se convierte más fácilmente a NOx, por lo que incluso niveles bajos de N₂ pueden resultar significativos. Por consiguiente, es importante minimizar la entrada de aire en el horno.

La temperatura del gas residual del horno puede ser muy alta (1200 – 1300 °C) y requiere normalmente refrigeración. Debido al elevado contenido de agua y a la gran concentración de especies corrosi-

vas (Ej. cloruros y sulfatos), el enfriamiento se realiza normalmente mediante dilución con aire. Tras la dilución, los volúmenes de gases residuales son generalmente del orden de un 70 – 150 % de los volúmenes de gases residuales de un horno convencional, según el grado de dilución necesario.

La fusión con oxicombustión requiere diseños de quemadores distintos a los encontrados en la combustión convencional con aire-gas. Desde la introducción de la técnica, los sistemas de quemadores han tenido un desarrollo sustancial, desde las primeras modificaciones de diseños existentes hasta los actuales quemadores de oxicombustión bajos en NO_x altamente especializados, desarrollados específicamente para la fabricación de vidrio. Estos sistemas pueden incluir algunas de las características de otros quemadores bajos en NO_x de alta eficacia para combustión convencional. A continuación se resumen algunas de las características importantes de los principales sistemas patentados.

- ✓ Quemadores con llamas más largas y más anchas, con mejor luminosidad, que consiguen una transferencia de calor más profunda y uniforme.
- ✓ Llamas más planas con una cobertura más amplia.
- ✓ Mezcla retardada del combustible y el oxígeno para reducir las temperaturas máximas de llama en la zona rica en O₂.
- ✓ No hay refrigeración con agua.
- ✓ Posibilidad de ajuste de la intensidad y forma de las llamas.
- ✓ Uso de múltiples combustibles.

El oxígeno requerido para la combustión puede provenir del suministro directo al centro o de su producción in situ. Excepto para aplicaciones muy pequeñas (Ej. algunas plantas de fritas), las cantidades de oxígeno requeridas hacen que normalmente sea más económico producir el oxígeno in situ. No obstante, si una planta está situada cerca de un conducto de oxígeno industrial, normalmente es más económico obtener el oxígeno directamente del conducto. Existen dos técnicas principales para producir oxígeno in situ, criogénicamente o a través de un sistema de absorción. La planta de producción de oxígeno es normalmente propiedad del proveedor, que se encarga de su gestión y cobra por el oxígeno suministrado, aunque algunas empresas deciden tener la plena propiedad de la planta de oxígeno. Las plantas de oxígeno in situ disponen siempre de un almacenamiento extra de oxígeno líquido.

El oxígeno se produce criogénicamente comprimiendo aire y pasándolo a través de una unidad de purificación para eliminar el polvo, el agua, el dióxido de carbono y las trazas de contaminantes. El aire purificado se enfriá luego y se pasa a través de una columna de destilación a baja temperatura en la que se produce la separación. Los gases separados pueden calentarse en intercambiadores de aire para obtener oxígeno y nitrógeno en estado gaseoso y, si se precisa, puede tomarse oxígeno líquido de las partes más frías del sistema.

El proceso de absorción utiliza normalmente una de las dos formas siguientes: absorción por oscilación de vacío (VSA) o absorción por oscilación de presión (PSA). Ambos sistemas son no criogénicos, y la separación se produce a temperatura ambiente. La técnica es normalmente bastante más barata que un sistema criogénico, pero su capacidad es limitada y normalmente se escoge para demandas de oxígeno de nivel medio. La mayoría de centros de producción que deben abastecer sólo uno o dos hornos optan por esta técnica. Para hornos múltiples o para hornos con una elevada demanda de O₂ (Ej. vidrio flotado), puede ser preferible un sistema criogénico. La elección depende principalmente de factores económicos, que pueden estar influenciados por las condiciones locales.

El aire comprimido entra por la parte inferior de uno de dos recipientes de absorción provistos de zeolita, que absorbe la mayor parte del nitrógeno. El oxígeno se extrae de la parte superior del recipiente hasta que la zeolita esté saturada de nitrógeno. La corriente de aire se dirige luego al segundo recipiente,

mientras el nitrógeno del primer recipiente se evaca a la atmósfera. En el sistema de vacío, el nitrógeno se elimina por vacío, y en el sistema a presión se descarga a presión. El sistema de vacío ofrece normalmente mayores eficacias.

La técnica de calentamiento parcial con oxicombustión se ha estado utilizando en la fabricación de vidrio durante muchos años. Se han ensayado dos técnicas distintas: lanza de oxígeno para aplicar una inyección adicional de O₂ en un horno convencional de aire-combustible, con el fin de mejorar la transferencia de calor; o la adición de un quemador puro de oxicombustión. La técnica se ha utilizado principalmente para solucionar problemas de calidad del vidrio y de productividad del horno, aplicando de forma muy precisa llamas muy calientes en la superficie del material fundido, con el fin de aumentar los gradientes de temperatura y en consecuencia mejorar las corrientes de convección dentro de la masa fundida. Esto también reduce el caudal de gas residual que alimenta la misma energía al sistema. Esta técnica se ha utilizado frecuentemente para alargar la vida operativa de hornos que presentaban signos de deterioro o problemas con los regeneradores. Actualmente todavía se utiliza en este sentido, pero su uso es menos frecuente, debido a problemas de posible aumento de las emisiones de NOx a causa de las altas temperaturas.

Eficacia Medioambiental

En comparación con los hornos de aire-combustible, las emisiones de NOx se reducen generalmente en un 70 - 90%. Esta cifra depende evidentemente del punto de comparación y puede ser superior al 95% e inferior al 60%. Para hornos de fibra de vidrio y de vidrio para envases, esto normalmente equivale a <1 kg/tonelada de vidrio fundido. Para vidrio especial (sin adición de nitratos), la cifra puede ser de 1 – 2 kg/tonelada de vidrio fundido [tm32 Beerkens]. Las últimas versiones de quemadores de oxicombustión, en combinación con un diseño y operación optimizados del horno, pueden en algunos casos reducir las emisiones hasta 0,3 – 0,8 kg NOx/tonelada de vidrio fundido. No hay información disponible sobre emisiones en el vidrio plano, pero se consideran probables emisiones de 0,5 – 1,5 kg/tonelada de vidrio fundido.

Las concentraciones de todos los contaminantes pueden de hecho ser mayores debido al volumen de gas reducido. Una corrección a un 8% de oxígeno no es particularmente significativa para hornos de oxicombustión, aunque la dilución con aire de enfriamiento normalmente lleva las concentraciones más cerca de niveles más normales.

La combustión con oxicombustión puede también ayudar a reducir las emisiones globales de compuestos volátiles del horno (partículas, fluoruros, cloruros, etc.), debido al menor caudal de gas sobre la masa fundida y en algunos casos a la reducción de las turbulencias. Las emisiones de partículas en los vidrios sodocálcicos pueden reducirse a 0,2 – 0,3 kg/tonelada de vidrio fundido, aunque esto no se observa en todas las aplicaciones [tm18 CPIV]. Las emisiones de partículas se reducen con mayor eficacia en los vidrios que contienen boro (hasta un 50%). En EE.UU., el motivo de la conversión a fusión de oxicombustión ha sido en muchos casos la reducción de las partículas más que la reducción de NOx. La reducción en el consumo de combustible produce asimismo menores emisiones de SO₂ para hornos con combustión de fuel-oil, y las emisiones de CO₂ se reducen asimismo en proporción a cualquier ahorro de energía.

Consideraciones Económicas

Los aspectos económicos de la fusión con oxicombustión pueden variar muchísimo entre los distintos sectores y de un caso a otro. Los costes son muy difíciles predecir, pero en la Sección 4.4.2.9. se dan algunas cifras indicativas. Los principales factores que afectan los costes son:

- ✓ El coste de inversión comparado con la alternativa más factible.
- ✓ El ahorro de energía que puede obtenerse (depende mucho del tamaño y diseño del horno).

- ✓ El coste del oxígeno aplicable a esa instalación.
- ✓ El posible efecto sobre la duración de la campaña y el riesgo económico que comporta.

Un factor importante en el coste de inversión es que los hornos de oxicombustión no tienen un sistema de precalentamiento de gas como en la combustión convencional, por lo que el coste de inversión es generalmente menor que para un horno regenerativo o de recuperación de similar productividad. Esto es más evidente para plantas nuevas, en las que se ahorra el coste total del sistema de precalentamiento. Los quemadores de oxicombustión más avanzados son generalmente más caros que los quemadores bajos en NOx avanzados, y los costes del sistema de control de oxígeno son bastante sustanciales (0,3 – 0,45 millones de euros). No obstante, para la mayoría de hornos, los costes adicionales de los quemadores de oxicombustión y del sistema de control son considerablemente menores que el ahorro del precalentador. Las preocupaciones sobre el efecto de la técnica en la vida del material refractario han conducido al uso de materiales más caros para la bóveda del horno. Si es necesario, este coste adicional podría reducir significativamente las ventajas en los costes de inversión. En el sector de fritas, los sistemas de precalentamiento son menos comunes, pero los costes de inversión adicionales se amortizan generalmente en dos años gracias a los sustanciales ahorros de energía [tm8 S23.03].

Para hornos regenerativos, los sistemas regeneradores pueden datar del primer horno construido en esa posición, y deberán repararse, actualizarse o sustituirse según convenga con cada reconstrucción del horno. Por consiguiente, aunque hay un ahorro significativo, puede que no sea tan grande como para una nueva planta. Con los hornos de recuperación, el recuperador se sustituye normalmente con cada reconstrucción del horno, pero la estructura de soporte puede reutilizarse si el diseño y la posición del horno no cambian sustancialmente. El ahorro de capital para plantas nuevas es del orden del 20% para hornos de recuperación y del 30 – 40% para hornos regenerativos.

Si el proveedor opera la planta de oxígeno, el coste de inversión se incluye generalmente en el gasto del oxígeno y no se considera separadamente. La estructura de la instalación de oxígeno la aporta normalmente la empresa productora de vidrio, pero su coste es bastante bajo. Si la empresa de vidrio decide operar la planta de oxígeno independientemente, el coste de inversión puede aumentar hasta en un 10% del coste del horno [tm29 Infomil]. Si el nitrógeno, subproducto de la producción de oxígeno, puede utilizarse o venderse, puede contribuir a reducir los costes globales.

Varios documentos de la bibliografía de la Industria del Vidrio [Ej. tm3 EPA, tm6 NOx Ind.duVerré] indican que los costes de la oxicombustión son mayores o iguales que los de la SCR. No obstante, esto no se ha reflejado totalmente en la práctica, y algunas empresas reportan conversiones neutras desde el punto de vista de costes o, en algunos casos, ahorros en costes operativos. La mayoría de resultados positivos son de conversiones de hornos regenerativos pequeños que no utilizan altos niveles de vidrio recuperado.

Dejando de lado las preocupaciones por la vida de los refractarios, en la mayoría de aplicaciones el factor relativo a la eficacia de costes de la oxicombustión será la diferencia entre los ahorros energéticos y los costes del oxígeno, en comparación con los costes de técnicas alternativas de eliminación de NOx. Estos son específicos de cada caso, y para muchos hornos pequeños el balance será beneficioso. No obstante, para los hornos grandes, los ahorros son generalmente menores, y el balance financiero dependerá mucho más de las circunstancias específicas, y otros factores (particularmente el coste anual de inversión) adquirirán mayor importancia. Los costes vigentes de la energía y particularmente del oxígeno (ambos sujetos a variaciones) son también obviamente importantes.

Aplicabilidad

Aunque el principio de fusión 100% con oxicombustión está bien establecido, particularmente en el sector de fritas, su uso en la industria del vidrio en conjunto se ha visto limitado por una serie de factores. La técnica es todavía considerada por algunos sectores de la industria del vidrio como una tecnología

en desarrollo con un posible elevado riesgo económico. No obstante, se está realizando un considerable trabajo de desarrollo, y el número de plantas y el nivel de experiencia operativa van en aumento.

En general, es beneficioso retrasar la instalación hasta la siguiente reconstrucción del horno para potenciar al máximo los posibles beneficios y evitar los problemas previstos anticipados. En principio, los quemadores de oxi-gas podrían instalarse en muchos procesos sin esperar hasta una reparación en frío. La instalación en caliente puede producir ahorro de energía y un mayor ritmo de trabajo. No obstante, es improbable que produzca menores emisiones de NOx, y de hecho puede incluso aumentar los niveles de NOx, y también hay peligro de desgaste acelerado del material refractario.

Se estima que un 5 – 10% de la producción mundial de vidrio se realiza con oxicombustión, pero esta cifra varía de un sector a otro. En EE.UU. Sólo hay una línea de vidrio flotado en funcionamiento. En Europa, según [tm17 Ercole], el 5,3 % de la producción de vidrio para envases se produce mediante oxicombustión. Para fibra de vidrio (lana de vidrio y filamento continuo) y para vidrio especial las cifras son 27,5 % y 48,5 % respectivamente. Estimaciones realizadas por el fabricante de oxígeno francés Aire Liquide indican que, de la producción total de vidrio realizada con oxicombustión, un 25% se produce en Europa y un 56% en Norteamérica.

Hay varios ejemplos de hornos de fusión con oxicombustión que operan con éxito en los siguientes sectores: vidrio para envases, lana de vidrio, vidrio especial (particularmente vidrio para TV), fibra de vidrio de filamentos continuos, y fritas [tm32 Beerken]. Se han llevado a cabo ensayos en el sector de vidrio doméstico que han dado una buena reducción de NOx, pero se han observado problemas de fuerte espumación. Esto no afectó en principio a la calidad del vidrio en este ejemplo, ya que el ensayo era con una formulación de vidrio menos sensible a estos factores. Los problemas observados en la producción de vidrio doméstico son similares a los encontrados inicialmente en otras aplicaciones, por ejemplo, en el vidrio para envases. Puede haber otras soluciones, pero los elevados requisitos de calidad hacen que su aplicación sea más difícil. Hay varios ejemplos de la técnica que funcionan con éxito en la producción de vidrio doméstico en todo el mundo. Por ejemplo:

Orrefors Kosta Boda, Suecia - < 5 toneladas/día de vidrio de cristal

Verrerie de La Rochère, Francia – 17 toneladas/día de vidrio sodocálcico

St George Crystal, USA – toneladas/día de vidrio al plomo

Nachtman, Alemania – 9 toneladas/día de vidrio al plomo

La única aplicación conocida en el Sector de Vidrio Plano es la conversión reciente de la línea Pilkington LOF en Ohio. Parece ser que hay otra planta de flotación prevista para conversión en EE.UU. Uno de los principales problemas con el uso de la fusión con oxicombustión es que todavía no es una técnica que esté totalmente probada en esta aplicación, técnica o económica. No hay obstáculos técnicos fundamentales a su aplicación, pero hay una serie de reservas importantes. La principal preocupación es la posibilidad de un importante desgaste del material refractario y un acortamiento de la campaña o la necesidad de una reparación cara. Las grandes inversiones y los elevados requisitos de calidad del vidrio plano hacen que los riesgos sean mayores que en otros sectores. Asimismo, las altas eficacias térmicas alcanzadas en el sector significan que los posibles ahorros de energía son mucho menores.

El sector ha adoptado en general la visión de que, si es necesario, habrá disponibles otras técnicas de reducción de NOx, por lo que los beneficios no justifican los riesgos de ser el primero en poner en práctica la técnica. En Pilkington LOF hay una serie de aspectos específicos de ese centro que hacen que la técnica pueda ser más eficaz desde el punto de vista de costes. Estos aspectos, combinados con el estado actual de los desarrollos y el deseo de conocer la eficacia práctica de la técnica, han llevado a la empresa a tomar la decisión de aplicarla. Actualmente no hay resultados disponibles.

Consideraciones Asociadas

Uno de los aspectos más importantes relacionados con esta técnica es el ahorro de energía que puede conseguirse. Como se ha indicado anteriormente, éste puede ser a menudo el factor decisivo en la viabilidad económica de la técnica en una aplicación particular. A la hora de considerar la eficacia en cuanto a costes de la técnica, debe compararse no sólo con el horno que sustituye, sino con todas las opciones disponibles y medidas de eliminación alternativas.

Los ahorros energéticos pueden ser superiores al 50% en hornos pequeños y térmicamente ineficaces (Ej. hornos de fritas). Para un horno de recuperación de tamaño medio sin medidas especializadas de ahorro de energía, niveles de aislamiento estándar, y que sólo utilice vidrio recuperado interno, el consumo energético con oxicombustión sería del orden de un 20 – 50% inferior. No obstante, para hornos regenerativos grandes y eficaces desde el punto de vista energético con un comportamiento térmico optimizado, el ahorro es mucho menor (5 - 15 % - BOC plc), y es posible que sea casi nulo. En estos casos, es menos probable que el ahorro de energía compense el coste del oxígeno. Cada caso es único y debe considerarse teniendo en cuenta las circunstancias individuales.

Las medidas de ahorro energético disponibles para hornos convencionales Ej. calderas de recuperación, mayor aislamiento, quemadores de alta eficacia, y precalentamiento del vidrio recuperado) no han sido tan ampliamente aplicadas a hornos de oxicombustión. Existe cierta experiencia con estas técnicas; en el momento presente parece ser que hay al menos dos hornos equipados con calderas de recuperación y uno con precalentamiento del vidrio de recuperación. No obstante, a medida que aumente la experiencia, será posible el uso de mayor número de estas medidas con la oxicombustión. No existen motivos técnicos por los que la mayoría de estas técnicas no puedan usarse con la oxicombustión, pero hay aspectos técnicos importantes que deben estudiarse y que llevará tiempo resolver (Ej. el nivel óptimo de aislamiento posible sin comprometer la vida del material refractario).

Un aspecto particular que podría mejorar la economía de la fusión con oxicombustión es la recuperación de calor de los gases residuales. La elevada temperatura de los gases residuales mejora el potencial de recuperación de calor, pero hay también una serie de dificultades. Los gases residuales requieren enfriamiento antes de cualquier tratamiento, con el fin de alcanzar la temperatura operativa del equipo de eliminación y asegurar que las partículas que puedan derivarse de los compuestos volátiles hayan condensado. La naturaleza de los gases residuales de muchos hornos limita el uso de intercambiadores de calor directos debido a problemas como obstrucción por partículas condensadas y corrosión. Estos problemas se ven incrementados por las altas concentraciones de los gases residuales asociados con la oxicombustión. Existe un problema particular en los vidrios que contienen boro, en los que los gases deben ser enfriados rápidamente para evitar la formación de sólidos pegajosos que sean corrosivos y que puedan causar fácilmente obstrucciones en los conductos y equipos de eliminación como los precipitadores electrostáticos. Por este motivo, el enfriamiento tiende a realizarse mediante dilución con aire.

Potencialmente, la forma más prometedora de recuperar calor de los gases residuales de los hornos de oxicombustión de vidrio para envases podría ser el uso de un sistema de precalentamiento de mezcla y vidrio recuperado (ver Sección 4.8). También se han realizado ensayos iniciales con el precalentamiento del suministro de oxígeno. Las opciones de recuperación de calor de los hornos de oxicombustión se discuten en [tm45 Illy]. Se ha hecho algún trabajo de desarrollo en el precalentamiento de los suministros de gas y oxígeno, pero no se ha desarrollado a plena escala y no puede considerarse como disponible.

Si se considera el impacto medioambiental global de la fusión con oxicombustión, debe tenerse en cuenta el impacto medioambiental de la producción de oxígeno. Este es extremadamente difícil de calcular y varía en gran medida de un caso a otro. El impacto medioambiental de la producción de oxígeno está relacionado principalmente con las emisiones asociadas con la producción de la electricidad consumida. Esto es casi imposible de evaluar, excepto para un caso específico en el que puedan derivarse (entre otras cosas) el consumo de oxígeno, el método de producción de oxígeno, las estadísticas nacionales de las emisiones medias de la producción de electricidad, y el ahorro de energía en dicha aplicación. En promedio,

la producción de oxígeno mediante VVSA consume aproximadamente 1,44 MJ/Nm³ [comunicación privada BOC].

En general, puede decirse que, si el ahorro de energía de la fusión con oxicombustión supera los costes de la producción de oxígeno, las emisiones reducidas superarán considerablemente las emisiones asociadas con la producción de oxígeno. En los hornos recuperativos sin recuperación de energía adicional (caldera de recuperación o precalentamiento del vidrio recuperado), el ahorro de energía medio incluida la producción de oxígeno será del 25 - 35 %, y para hornos regenerativos grandes del 5 - 15 %. Para hornos regenerativos de alta eficacia, esta cifra puede ser inferior al 5%. Igual que en todas las medidas de eliminación que requieren energía, los beneficios medioambientales observados in situ se ven parcialmente erosionados si se hace una consideración global.

La fusión con oxicombustión comporta mayores temperaturas de llama, que en algunas aplicaciones puede producir mayor productividad por metro cuadrado de superficie del horno (hasta un 25% más). Esto es particularmente importante cuando se desea aumentar la capacidad de un horno, pero no hay espacio disponible para albergar un horno convencional del tamaño deseado. Esta situación se ve además favorecida por la ausencia de sistema de precalentamiento. En algunas aplicaciones, la técnica puede también conducir a un mejor control de proceso y a una mejora en la calidad del vidrio. Esto es particularmente cierto para algunos procesos de vidrio especial que requieren elevadas temperaturas de fusión. Sin embargo, los niveles más elevados de oxígeno y vapor de agua pueden afectar la composición química de algunos tipos de vidrio, lo que hace necesario cambiar la composición de la mezcla.

Existe la preocupación de que las temperaturas más elevadas asociadas con la técnica puedan producir un mayor desgaste del material refractario y acortar por lo tanto la vida del horno. En algunos casos, esto puede producir un mayor nivel de defectos en el vidrio (Ej. debido a exudación en la bóveda). La reducción de la duración de las campañas puede tener un impacto económico muy importante en una planta, especialmente para hornos grandes como los de vidrio de flotado. La experiencia hasta la fecha varía de una aplicación a otra, y los resultados van desde malos a muy prometedores. Se ha realizado gran cantidad de trabajo en este campo, y el problema puede reducirse muchísimo. Algunos productores de vidrio de borosilicato informan de una extensión en la vida del horno, y en algunas aplicaciones se han registrado temperaturas de bóveda más bajas tras la conversión.

Los nuevos sistemas de quemadores de alta emisividad son mucho más eficaces en la transferencia de calor al vidrio. Combinados con un diseño preciso del horno, una cuidadosa posición de los quemadores y refractarios de mayor calidad, estos quemadores facilitan el mantenimiento de la operación dentro del límite de resistencia térmica de los refractarios. El uso de materiales refractarios de mayor calidad puede aumentar el coste de inversión del horno, y aún queda la preocupación de que no sean suficientemente resistentes en todas las aplicaciones. En el vidrio sodocálcico, la elevada presión de vapor del agua puede causar elevadas presiones de vapor de NaOH, que puede contribuir al desgaste del material refractario, especialmente por encima del nivel del vidrio.

En el momento presente, los hornos de oxicombustión más antiguos tienen menos de diez años y, en general, no hay suficiente experiencia con la técnica en hornos de vidrio grandes para tener confianza en su efecto a largo plazo sobre las vidas útiles de los hornos. No obstante, la técnica está en constante desarrollo, y los hornos diseñados con las técnicas más recientes pueden tener campañas más largas que los hornos antiguos. En algunas aplicaciones se han reportado problemas con formación de espuma en la mezcla. Esto puede causar problemas de calidad y reducir la eficacia y estabilidad del calentamiento.

En la fabricación de lana de vidrio, los altos niveles de oxígeno en el horno pueden hacer más fácil reciclar los residuos que contienen compuestos orgánicos sin tener que usar nitratos.

La elevada concentración de vapor de agua en la atmósfera del horno creada por la oxicombustión puede ser la base de una importante ventaja de esta técnica. En [tm17 Ercole] se indica que, si puede encontrarse una forma de optimizar la absorción química de agua durante la fusión, pueden producirse

cambios muy favorables en la estructura del vidrio. Los cambios derivados de la reacción con el vapor de agua pueden reducir la viscosidad del vidrio a todas las temperaturas y producir una transmisión de calor más favorable de la llama a la masa fundida. También puede hacer que el enfriamiento durante el moldeo sea mucho más fácil, lo que puede ser particularmente importante en vidrio para envases y vidrio doméstico.

Instalaciones de Ejemplo

Owens Corning Building Products (Reino Unido) Ltd, Cwmbran, Reino Unido – Lana de Vidrio.

Schott Glas, Mainz, Alemania – Vidrio Especial.

Pilkington-LOF, Ohio, USA – Vidrio flotado.

Heye Glas, Moerdijk, Holanda – Vidrio para Envases.

PPG Industries, Hoogezand, Holanda – Filamentos Continuos.

James Kent Ltd, Stoke on Trent, Reino Unido - Fritas.

Saint Gobain Desjonqueres, Mers, Francia – Vidrio para Envases.

Resumen

Debido a la complejidad de los aspectos asociados con esta técnica, se ha considerado útil incluir el siguiente resumen de conclusiones.

Ventajas

- Pueden conseguirse reducciones sustanciales en las emisiones de NOx (70 - 90 %).
- Los costes de inversión de los hornos son considerablemente menores.
- En algunas aplicaciones, la técnica tiene un coste neutro o produce ahorros.
- Son posibles reducciones sustanciales en el consumo de energía en algunas aplicaciones (particularmente cuando se sustituye un horno de recuperación).
- Potencial de menores emisiones de sustancias volátiles y polvo.
- Cuando los volúmenes de gas residual son reducidos, pueden reducirse los costes de inversión del equipo de eliminación.
- Potencial de mejora de la producción por m² y mejor control de proceso.

Desventajas

- Si no se consiguen ahorros sustanciales de energía, la técnica puede ser muy cara, especialmente para hornos de vidrio sodocálcico grandes.
- La eficacia de costes varía mucho entre aplicaciones y debe determinarse individualmente.
- Puede haber problemas con el desgaste del material refractario, que no han sido totalmente resueltos.
- La producción de oxígeno consume energía eléctrica.
- La técnica es esencialmente una medida primaria por cuanto reduce la formación de NOx, pero no hace nada por reducir el NOx de las fuentes no térmicas, como por ejemplo los nitratos de la mezcla.
- La técnica tiene mayor eficacia si se combina con la reconstrucción de un horno.
- El almacenamiento, producción y uso de oxígeno tienen riesgos inherentes, por lo que hay que hacer los estudios de seguridad pertinentes.
- La producción de oxígeno genera ruido, que debe controlarse.

Tabla 4.8: Principales ventajas y desventajas de la fusión con oxicombustión

La fusión con oxicombustión puede ser una técnica muy eficaz para la eliminación de NOx, y con la excepción del vidrio plano y, en menor medida, el vidrio doméstico, la técnica puede considerarse técnicamente probada. En principio, la fusión con oxicombustión puede considerarse aplicable a la Industria del Vidrio en su conjunto, pero no deben subestimarse los problemas de su puesta en práctica.

Todavía hay algunas cuestiones importantes sin resolver por lo que respecta a la vida útil de los materiales refractarios de los hornos. Parece probable que se encuentren soluciones a este problema, pero

llevará algún tiempo probar sus efectos a largo plazo con confianza. Hasta entonces, la técnica tendrá asociado un grado de riesgo económico.

La competitividad económica de la técnica depende principalmente del potencial de ahorro energético, y de los costes relativos de técnicas alternativas para alcanzar niveles comparables de emisiones de NOx. En muchas aplicaciones que requieren hornos pequeños o medios pueden obtenerse ahorros energéticos considerables, lo que hace que la técnica sea más competitiva. De hecho, en algunas aplicaciones (particularmente en hornos de <50 toneladas al día), el ahorro de energía sólo puede ser motivo suficiente para instalar la técnica. Los hornos grandes tienden a ser inherentemente más eficaces desde el punto de vista energético, y las reducciones potenciales en el consumo de energía son mucho menores, lo que aumenta el coste global de la técnica. En una serie de aplicaciones, es improbable que los ahorros compensen los costes, por lo que puede que la técnica no sea la forma más eficaz desde el punto de vista de costes de alcanzar las reducciones de NOx.

Las mejoras en la eficacia de otras técnicas de eliminación de NOx (particularmente las técnicas primarias y 3R), en combinación con los avances en la eficiencia energética de los hornos, están erosionando la competitividad económica de la fusión con oxicombustión. No obstante, en aplicaciones en las que estos desarrollos no han sido tan grandes o en la que otros factores limitan su aplicación (Ej. lana de vidrio y vidrio especial), la fusión con oxicombustión es potencialmente una técnica muy atractiva.

Los méritos relativos de la fusión con oxicombustión varían mucho de un caso a otro, y la decisión de aplicar la técnica puede verse muy afectada por otros factores. Por ejemplo, si se desea un aumento en la productividad sin aumentar el tamaño del horno, o si la planta está situada cerca de una fuente barata de oxígeno. La economía puede verse afectada hasta tal grado por factores específicos del centro de producción, que debe considerarse cada caso de acuerdo con sus circunstancias individuales.

Siguen produciéndose desarrollos que pueden mejorar la eficacia de la combustión con oxi-gas, y las empresas de oxígeno siguen realizando constantes desarrollos para reducir los costes de la producción de oxígeno.

La fusión con oxicombustión debe considerarse como una entre una serie de medidas de eliminación de NOx que, según los aspectos específicos del centro de producción, pueden representar el enfoque más apropiado dado el caso. No obstante, debe reconocerse que se trata de una de las técnicas clave a la hora de determinar los niveles de emisiones que representan la MTD en la Industria del Vidrio.

4.4.2.6. Reducción Química por Combustible (RQC)

La reducción química por combustible describe las técnicas en las que se agrega combustible a la corriente de gas residual para reducir químicamente el NOx a N₂ mediante una serie de reacciones. El combustible no se quema, sino que se piroliza formando radicales, que reaccionan con los componentes del gas residual. Las dos técnicas principales que se han desarrollado para su uso en la Industria del Vidrio son el proceso 3R y el proceso de Recombustión. Ambas técnicas están actualmente restringidas a hornos regenerativos. El proceso 3R ha sido desarrollado totalmente para su aplicación dentro de la industria, y en el momento presente el proceso de Recombustión está en la segunda fase de ensayos a plena escala de producción, habiendo mostrado resultados prometedores.

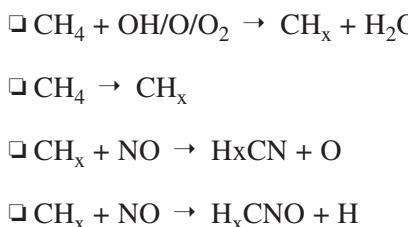
4.4.2.6.1. El Proceso 3R

Descripción de la Técnica

La base del proceso 3R es la adición de un combustible a base de hidrocarburos (Ej. gas natural o fuel-oil) de forma controlada en la corriente de gas residual a la entrada del regenerador. Este combustible no se quema, sino que se disocia y actúa para reducir químicamente el NOx formado en el horno. La tecnología está diseñada para ser usada en hornos regenerativos, en los que el regenerador proporciona las

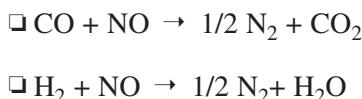
condiciones necesarias de temperatura, mezcla turbulenta y tiempo de estancia para que tengan lugar las reacciones. El nombre del proceso, 3R, hace referencia a Reacción y Reducción en Regeneradores.

El proceso 3R comporta dos etapas principales, eliminación de NOx y quema. En la etapas de eliminación de NOx, hay dos mecanismos principales, el primero de ellos es la reacción entre los radicales del combustible de 3R y el NO. Los radicales (CH_x) se forman principalmente por descomposición térmica (pirolisis), que se produce muy rápidamente al entrar el combustible en el regenerador. Las principales reacciones que se producen en esta etapa son:

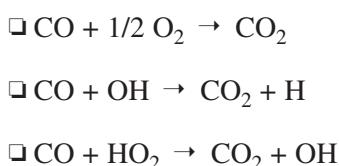


Estas reacciones son muy rápidas y tienen lugar principalmente en la cámara superior del regenerador. Son responsables de alrededor del 25% de la reducción de NOx.

El segundo mecanismo tiene lugar al pasar los gases residuales a través de las pilas del regenerador, donde el tiempo de estancia es relativamente largo. El CO y H₂ (formados de los combustibles primarios y de 3R) tienen un tiempo adecuado a una temperatura suficientemente elevada para reducir la mayor parte del NO restante a N₂. Esta reacción tiene lugar a lo largo del sistema regenerador, pero principalmente en las pilas, y representa la mayor parte de la reducción de NOx conseguida por el proceso 3R. Las principales reacciones son:



La segunda fase del proceso comporta la combustión de las sustancias reducidas, principalmente el H₂ y CO sin reaccionar. Las sustancias son oxidadas mediante el suministro controlado de aire a los canales de llamas situados bajo el regenerador. A continuación se detallan las reacciones principales:



Eficacia Medioambiental

El grado de reducción de NOx alcanzado con el proceso 3R depende principalmente de la cantidad de combustible adicional agregado, y puede ajustarse para cumplir diversos estándares de emisiones. La técnica puede alcanzar concentraciones por debajo de 500 mg/Nm³ a un 8 % de volumen seco de O₂, y en algunas aplicaciones se han alcanzado cifras próximas a 400 mg/Nm³. Según la aplicación, esto equivale a 1,0 – 1,5 kg/tonelada de vidrio fundido, y una reducción global de NOx del orden del 70 - 85 %.

Consideraciones Económicas

Los costes de inversión pueden ser de hasta 300.000 euros, pero por lo general son considerablemente menores. Con condiciones de fusión optimizadas, los costes operativos para alcanzar 500 mg/Nm³ son de 1,5 – 2,0 euros por tonelada de vidrio fundido, debido principalmente a los requisitos de combustible, lo que equivale unos 350 euros por tonelada de NOx eliminado. A estos costes debe agregarse el coste de la licencia de la tecnología. La fórmula de tasas de licencia es bastante compleja, pero a lo largo

de la vida del horno, la licencia equivale normalmente unos 0,5 euros por tonelada de vidrio fundido.

Aplicabilidad

Actualmente, la técnica sólo se considera aplicable a hornos regenerativos, pero es aplicable a plantas nuevas y existentes, así como a hornos con combustión a fuel-oil o a gas natural. Actualmente hay siete hornos que emplean la técnica, y muchas más plantas han adquirido licencias para utilizarlas. El principal motivo por el que la técnica no se halla más ampliamente difundida es que las actuales emisiones de NOx de las plantas, utilizando métodos de reducción primarios, están en general dentro de los límites fijados por la legislación.

Existe la preocupación de que la atmósfera reductora creada en los regeneradores pueda dañar ciertos tipos de materiales refractarios, particularmente si se dan asimismo altas temperaturas. La mayor parte de la experiencia con la técnica procede de hornos de vidrio flotado, que tienden a utilizar materiales refractarios de alta calidad en los regeneradores. La posibilidad de daños del material refractario es mayor con refractarios de menor calidad (como los que contienen Ca, Fe y Cr), que se encuentran en algunas plantas de vidrio para envases. Aunque es un aspecto que depende de cada caso específico, la sustitución de los refractarios existentes por materiales de mayor resistencia térmica y química podría representar costes sustanciales.

Los promotores de la técnica prevén que en la gran mayoría de los casos no serán necesarias reparaciones de los regeneradores. La Sección 4.4.2.9 muestra los costes en los extremos de los márgenes probables, con y sin reparación de los regeneradores.

Consideraciones Asociadas

Los principales inconvenientes del proceso 3R son que el uso de combustibles a base de hidrocarburos para conseguir la reducción necesaria de NOx comporta un coste inherente y produce un aumento en las emisiones de CO₂. Esto significa que es atractivo combinar el proceso 3R con medidas primarias más convencionales de reducción de NOx con el fin de reducir el consumo de combustible del proceso 3R.

Si se instala una caldera de recuperación, la mayor parte de la energía del combustible del proceso 3R puede recuperarse, y el aumento global de CO₂ será mínimo. El uso del proceso 3R no implica necesariamente que una caldera de recuperación vaya a ser globalmente eficaz desde el punto de vista de costes, pero si hay una instalada (o se proyecta instalar), el proceso 3R produce un aumento ventajoso del rango de mezclas del horno en el que puede utilizarse la caldera. Globalmente, esto puede producir un ahorro sustancial en los requisitos de energía del centro de producción, y el consumo de otras fuentes de energía (Ej. calderas de combustibles fósiles) puede reducirse enormemente. Según la aplicación específica, este ahorro de energía significa que el proceso 3R puede originar considerables ahorros de costes (un ejemplo [tm39 3R-update] indica una cifra de alrededor de 600.000 euros/año).

Sin recuperación mediante calderas en la planta, el combustible adicional requerido representa normalmente alrededor de un 7% de la energía de fusión. Esto supone un aumento de las emisiones de CO₂ de 20 - 30 kg por tonelada de vidrio fundido o 4 - 6 toneladas por tonelada de NOx eliminado. En la práctica, los requisitos precisos de combustible para alcanzar la reducción de NOx deseada pueden variar según las condiciones específicas del horno. Por ejemplo, si se requieren condiciones oxidante en el horno, el consumo de combustible será mayor que cuando se den condiciones más reductoras.

Aunque el proceso 3R se considera en ocasiones una técnica primaria debido a su relativa simplicidad, comparte una característica importante de las técnicas secundarias como la SCR y la SNCR, ya que no sólo reduce el NOx térmico, sino también el NOx de otras fuentes, como las materias primas.

<u>Ventajas</u>
• Puede conseguir reducciones sustanciales de NOx.
• Aplicable a la mayoría de tipos de hornos regenerativos
• No representa cambios importantes en el diseño o funcionamiento de la planta.
• Bajos costes de inversión.
• Puede aplicarse sin necesidad de parar el horno.
• No se requieren reactivos químicos.
• El mayor consumo de combustible puede compensarse en algunos casos por la recuperación de calor perdido.
• Puede considerarse como una tecnología probada y fiable.
• Reduce el NOx de todas las fuentes.
<u>Desventajas</u>
• Mayor consumo de combustible (generalmente un 7 %, pero puede reducirse con recuperación de calor perdido).
• Mayores emisiones de CO ₂ (20 - 30 kg/t de vidrio fundido, pero puede reducirse con recuperación de calor perdido).
• Preocupación sobre el efecto sobre los materiales refractarios de los regeneradores en algunas aplicaciones.
• No aplicable a hornos no regenerativos.

Tabla 4.9: Principales ventajas y desventajas del Proceso 3R

Instalaciones de Ejemplo

Pilkington Reino Unido Ltd, Greengate Works, St Helens, Reino Unido.

Flachglas AG, Weiherhammer, Bavaria, Alemania.

Flachglas AG, Gladbeck, Nordrhein-Westphalia, Alemania.

Pilkington Finlandia

Pilkington LOF, Ohio, California

Samsung Corning, Korea

(Todas ellas instalaciones de Vidrio flotado, excepto Samsung Corning, que es de Vidrio para TV)

4.4.2.6.2 Recombustión [tm53 Gas Reburning], [tm54 Gas Reburning2], [tm55 Field Test], y [tm56 GazdeFrance]

Descripción de la Técnica

La recombustión es una tecnología de modificación de la combustión que elimina el NOx de los productos de combustión utilizando combustible como agente reductor. Puede utilizarse para controlar las emisiones de prácticamente cualquier fuente de emisiones continuas, y no es específica del combustible, aunque generalmente se utiliza gas natural.

La técnica se aplicó originalmente a plantas de calderas grandes a principios de los 80, y se basa en el principio de que los radicales CH del combustible pirolizado reaccionan para reducir las especies de NO a N₂ a través de una serie de reacciones. La tecnología de recombustión ha sido demostrada con éxito en calderas de servicio, logrando normalmente eficacias de eliminación de NOx entre el 50 % - 65 % a un coste moderado por tonelada de NOx eliminado.

Estos resultados han llevado a considerar el uso de la recombustión en la Industria del Vidrio. Los hornos de vidrio parecían ser buenos candidatos para una instalación eficaz de recombustión debido a sus grandes cavidades post-fusión (cañales de llama del horno y bóveda del regenerador) y características como gases de combustión calientes y elevadas concentraciones iniciales de NOx.

En la figura inferior se muestra un esquema del proceso. El proceso de recombustión puede dividir-

se conceptualmente en tres zonas, la zona primaria, la zona de recombustión y la zona de quema. En la zona primaria, el combustible y el aire se combustionan a través de los quemadores existentes del horno con una estequiometría de combustible primario normal o reducida. El nivel del NOx que sale de la zona es la entrada al proceso de recombustión. En la zona de recombustión, se inyecta el combustible de recombustión después de la zona primaria, creando una zona de reducción de NOx rica en combustible. Según la estequiometría primaria, la cantidad de combustible requerido es de un 5 – 20% del combustible primario. En la zona de quema, se agrega aire para producir condiciones globales pobres en combustible y para oxidar todas las especies no combustionadas.

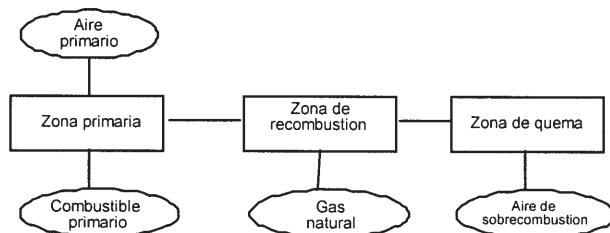
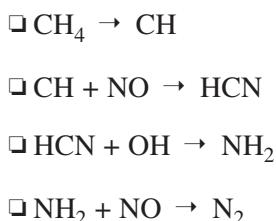


Figura 4.1: Vista General del Proceso de Recombustión

Los radicales de los hidrocarburos formados a partir del gas natural en la zona de recombustión rica en combustible, principalmente radicales CH, reaccionan con el NO formado en la zona primaria para formar otros compuestos de nitrógeno como HCN y NH₃. Una vez formados, estos compuestos reaccionan rápidamente con otras moléculas de NO primario, formando nitrógeno molecular (N₂). Tras dejar que el combustible de recombustión se mezcle y reaccione con los gases de combustión, se inyecta el aire de quema para completar la combustión del combustible de recombustión. En la zona de quema, los compuestos reducidos de nitrógeno que puedan quedar son convertidos completamente a nitrógeno molecular (N₂) o nuevamente a NO. Las temperaturas elevadas de gases de combustión y las concentraciones elevadas de NOx primario han demostrado que mejoran la reducción de NOx alcanzable con la recombustión. Si la recombustión puede realizarse en condiciones prácticamente isotérmicas y con tiempos de estancia de unos 0,5 segundos, en teoría pueden alcanzarse reducciones de NOx significativas. La principal vía de reacción se resume a continuación.



Para la aplicación de la recombustión a hornos de vidrio, es de esperar que el combustible de recombustión se inyecte en el extremo posterior del horno de fusión, o justo después de horno de fusión para minimizar el impacto de la distribución de calor sobre la masa fundida. Para hornos de vidrio con suficiente tiempo de estancia del gas entre el punto de inyección del combustible de recombustión y el dispositivo de recuperación de calor (es decir, el regenerador o recuperador), el aire de quema se inyectaría justo antes del dispositivo de recuperación de calor.

Eficacia Medioambiental

Esta tecnología se ensayó en 1996 en un horno de vidrio para envases de 350 t/día situado en Antioch (California, EE.UU.). Debido a los reglamentos existentes sobre control de NOx, se seleccionó como objetivo una reducción del 50% (2,5 kg de NOx/tonelada de vidrio). El nivel de base de las emisiones de NOx era de unos 3500 mg/Nm³ a un 8 % de O₂ y, reduciendo la cantidad de aire primario, este valor se redujo a 2500 mg/Nm³. Utilizando un 5% de gas natural (en comparación con el aporte de calor prima-

rio) se consiguió un valor de 1800 mg/Nm³, y aumentando la cantidad de gas de recombustión al 9%, las emisiones de NOx se redujeron 1000 mg/Nm³. La temperatura de los gases de combustión aumentó entre 40 y 80 °C, lo que produjo un aumento en la temperatura del aire precalentado. Por consiguiente, dos tercios de la energía se recuperaron usando un 9% de gas natural con un aumento del consumo de combustible del 3%.

Hay otro ensayo actualmente en curso en Glaverbel-Francia. El principal objetivo del mismo es reducir las emisiones de NOx en un 50% o alcanzar el valor de 500 mg/Nm³. La estrategia utilizada para conseguir estos objetivos es centrarse en los quemadores que generan los mayores niveles de NOx y que por lo tanto son más fáciles de tratar. Según la configuración, se espera recuperar al menos un 50% de la energía. Por consiguiente, el consumo adicional de combustible debería limitarse a aproximadamente un 4%.

Consideraciones Económicas

Los costes de inversión para el proceso de recombustión se estiman en 800.000 euros para un horno de vidrio plano de 500 t/día, 500.000 euros para un horno de vidrio para envases de 250 t/día, y 320.000 euros para un horno de fibra de vidrio de 125 t/día. Los costes operativos dependen del número de quemadores tratados, de la cantidad de gas utilizado y del porcentaje de calor recuperado. Estos costes están entre 0,5 y 1,5 euros/tonelada de vidrio.

Aplicabilidad

La técnica es aplicable a hornos tanto nuevos como existentes. No obstante, en el momento presente no hay ejemplos de su uso a largo plazo y a plena escala de producción, por lo que todavía se considera como una técnica en fase de desarrollo. La recombustión es adecuada para la modernización de instalaciones existentes, ya que las modificaciones necesarias para instalar la tecnología son mínimas. La aplicación de la recombustión durante la reconstrucción de un horno ofrece el potencial de minimizar el impacto en la eficacia térmica del horno y aumentar las reducciones de NOx. Por ejemplo, pueden rediseñarse los regeneradores para recuperar sustancialmente el contenido calorífico del combustible de recombustión y para poner en práctica un concepto avanzado de recombustión de gas. La tecnología de recombustión se utiliza normalmente después de medidas de control primario de NOx, y pueden alcanzar reducciones de NOx de hasta un 70%.

Consideraciones Asociadas

Los criterios de diseño primarios de la recombustión es conseguir una estequiometría en la zona de recombustión de 0,9, el valor óptimo para la operación de recombustión. Para aplicaciones en hornos de vidrio, se supone que el combustible de recombustión se agrega al sistema después del horno de fusión, con el fin de minimizar el impacto de la recombustión sobre la masa fundida. En una aplicación real, puede ser posible inyectar el combustible de recombustión al final de la región de fusión, aunque esta posibilidad debería evaluarse para cada centro de producción específico. La inyección de combustible de recombustión después de la fusión puede reducir la eficacia global del horno si el aporte de calor agregado no se recupera plenamente en los regeneradores. Por consiguiente, para minimizar la cantidad de combustible de recombustión inyectado y su impacto sobre la eficacia del horno, la estequiometría primaria debe minimizarse (entre 1,01 y 1,05). Estos niveles deben ser alcanzables en la mayoría de hornos de vidrio, pero pueden requerir una cierta optimización de la velocidad de combustión del horno y de su distribución. En los hornos en los que no sea posible minimizar la estequiometría del horno de fusión sin un impacto sobre el funcionamiento del horno o la calidad del vidrio, parte de la energía asociada con el combustible de recombustión será absorbida por el regenerador, lo que producirá temperaturas de precalentamiento del aire más elevadas. El menor consumo de combustible primario producirá menores caudales de aire y una reducción en los requisitos de combustible de recombustión y de aire de sobrecombustión. Por lo tanto, la determinación del balance de material de recombustión es un cálculo iterativo.

La inyección del combustible de recombustión después del horno aumenta la temperatura del gas de combustión en los regeneradores en 50 – 100 °C, según la configuración. En consecuencia, la temperatu-

ra del aire precalentado aumenta y permite la recuperación de parte de la energía utilizada para recombustión. Para limitar el aumento de temperatura en los regeneradores, se controla la cantidad de aire de sobrecombustión. La cantidad de energía recuperada depende de la cantidad de gas utilizado para recombustión y de la cantidad de aire de sobrecombustión inyectado. Es posible recuperar hasta dos tercios de la energía utilizada para la operación de recombustión.

Instalaciones de Ejemplo

Glaverbel, Francia – Vidrio flotado

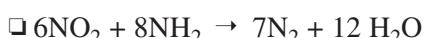
4.4.2.7. Reducción Catalítica Selectiva (SCR)

Descripción de la Técnica

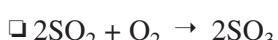
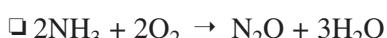
La SCR consiste en la reacción del NOx con amoniaco en un lecho catalítico a la temperatura apropiada. Hay varios catalizadores disponibles, cada uno de ellos opera en un margen de temperatura ligeramente distinto. Los catalizadores más comunes son óxidos de vanadio y titanio (normalmente TiO₂ y V₂O₅) impregnados sobre un substrato metálico o cerámico. También pueden usarse tamices moleculares de zeolitas, en los que la reacción tiene lugar en la estructura porosa microscópica. La eficacia de las zeolitas puede optimizarse agregando metales como platino o paladio a la estructura. Sea cual sea el catalizador empleado, es importante mantener la temperatura operativa correcta normalmente de 200°C a 500°C, siendo el rango óptimo de 300°C a 450°C.

Las unidades de catálisis utilizadas en la Industria del Vidrio son estructuras modulares en forma de panal, aunque en algunas industrias se utilizan formas granulares o de placas. El tamaño de la unidad depende del volumen de gas residual tratado y de la reducción de NOx. La estructura modular permite una fácil sustitución de las secciones, o la adición de más catalizador. La vida útil de los catalizadores depende de muchos factores, particularmente de la composición de los gases residuales y del diseño de la planta. La mayoría de proveedores garantizan más de tres años, y en la mayoría de aplicaciones cabe esperar una duración de 5 ó 6 años sin un deterioro significativo de la actividad. En las primeras aplicaciones en la industria del vidrio, se experimentaron problemas con catalizadores cuya actividad se reducía notablemente al cabo de 3 años.

Los sistemas están normalmente diseñados para conseguir una reducción de NOx del 75 – 95%. En teoría, la eficacia de reducción de NOx aumenta con la relación NH₃:NOx, pero esta se mantiene normalmente por debajo de 1,1:1 para minimizar la penetración de amoniaco. El NOx reacciona con el NH₃ según las reacciones que se indican a continuación. Estas reacciones se producen normalmente a unos 950 °C (SNCR), pero la presencia del catalizador reduce la temperatura absorbiendo el NH₃ que reacciona con el NO de la fase gaseosa. El amoniaco se inyecta antes del catalizador, como NH₃ líquido o como una solución acuosa. En algunas aplicaciones se ha empleado urea, pero no es una solución utilizada en la Industria del Vidrio.



También pueden producirse varias reacciones no deseadas:



Con la SCR, la producción de N₂O es muy baja y normalmente no supone un problema. La formación de SO₃ y la reacción subsiguiente a bisulfato amónico (NH₄HSO₄) puede ser un problema, especialmente con combustibles con alto nivel de azufre. El bisulfato amónico puede envenenar el catalizador y causar obstrucción y corrosión del equipo. Algunos polvos que contienen metales alcalinos (como MgO, CaO, Na₂O, K₂O) o metales pesados pueden también actuar como venenos del catalizador.

Aunque hay sistemas con elevado nivel de polvo, en los procesos de vidrio es necesario instalar una unidad de eliminación de polvo antes de la unidad de SCR. Esta unidad debe reducir la concentración de polvo a 10 - 15 mg/Nm³, y es casi siempre un precipitador electrostático (2 ó 3 etapas). Las bajas temperaturas operativas de los filtros de mangas harían necesario calentar el gas residual a la temperatura de reacción del catalizador, lo que aumentaría mucho los costes operativos y en general se consideraría como algo prohibitivamente caro. Es también necesario soplar aire a través del lecho del catalizador (cada 2 horas aproximadamente) para evitar obstrucciones y bloqueos causados por el polvo fino restante. El uso del PE significa que, en muchos casos, debe instalarse asimismo un sistema de lavado de gases ácidos antes del PE. En el momento actual no hay experiencia en la Industria del Vidrio con combustión con fuel-oil pesado y SCR, y es necesario realizar mayor trabajo de desarrollo con el fin de determinar si la técnica es compatible.

Eficacia Medioambiental

Los niveles de emisiones de NOx alcanzados dependerán principalmente de la concentración de entrada y de la cantidad de catalizador y amoniaco utilizado. El nivel de amoniaco se mantiene normalmente por debajo de 1,1:1 para minimizar la penetración de amoniaco. En general, se indican reducciones de NOx de hasta un 70 - 95% para la mayoría de aplicaciones. Algunas aplicaciones en la industria del vidrio, como el vidrio especial, tienen elevadas emisiones de NOx sin eliminar (>4.000 mg/Nm³), y en teoría una reducción del 90% daría una concentración por debajo de 500 mg/Nm³. En teoría, dada una cantidad suficiente de catalizador, son posibles niveles de emisiones muy bajos, pero en la práctica hay muchos factores limitantes que restringen la eficacia.

Sin un alto grado de medidas de eliminación primaria de NOx, las emisiones de los hornos de vidrio más típicas serían del orden de 1200 mg/Nm³ a 2000 mg/Nm³, y una reducción del 80 - 90% daría valores que van desde menos de 200 mg/Nm³ a 500 mg/Nm³ y 0,5 - 1,0 kg/tonelada de vidrio fundido. Si se combina con las medidas primarias descritas en la Sección 4.4.2.1, pueden anticiparse cifras muy bajas.

En la mayoría de aplicaciones actuales dentro de la Industria del Vidrio, la SCR se utiliza para mantener el cumplimiento con la legislación local aplicable, que normalmente no es inferior a 500 mg/Nm³. Por consiguiente, con arreglo a las limitaciones discutidas en esta sección, para procesos de vidrio pueden alcanzarse niveles de emisiones de NOx de <500 mg/Nm³ (<800 mg/Nm³ para una alta concentración de entrada) con la SCR. En algunas industrias se han conseguido cifras de <200 mg/Nm³, y no es descabellado esperar que puedan obtenerse cifras similares en algunos casos en la Industria del Vidrio. No obstante, debe subrayarse que en el momento presente estas cifras tan bajas no han sido alcanzadas en la práctica en la Industria del Vidrio, y deben considerarse las implicaciones tanto técnicas como económicas. La mayoría de aplicaciones existentes de la técnica dentro de la Industria del Vidrio han conseguido reducciones del orden del 70 - 80 %, aunque existe potencial para alcanzar un 80 - 95 %, particularmente en una instalación nueva [tm6 NOx Ind.duVerre].

Consideraciones Económicas

El coste SCR depende principalmente del tamaño de la planta (volúmenes residuales a tratar) y de la eficacia de reducción de NOx deseada. En general, la técnica se considera que tiene un alto coste de inversión y unos costes operativos moderadamente altos. También, dado que la SCR es un sistema de eliminación integrado de 3 etapas, el coste de la técnica depende en gran medida de si el coste del PE y del lavador de gases residuales está o no incluido. En algunos casos, puede argumentarse que sin la instalación de la SCR el horno puede no requerir equipo de eliminación de polvo, en otros casos puede argumentarse que se trata de un requisito existente.

La información disponible no siempre es fácil de interpretar y es bastante específica de cada caso. A continuación se resume la información disponible en el momento presente.

Los datos más completos proceden de la planta de vidrio flotado Euroglas en Francia. Los costes abajo indicados se basan en un tipo de cambio de 6,6 francos franceses por euro.

Los costes de inversión del sistema completo han sido de 3,5 millones de euros, de los que la etapa de SCR representa 1,3 millones de euros. Se trataba de una planta nueva, por lo que no hubo costes de modernización. Los costes operativos (sobre la base de una vida útil del catalizador de 4 años, suponiendo el pleno reciclaje del polvo y excluyendo intereses y depreciaciones) fueron de 542.000 Euros (amoniaco 136.000, energía 83.000, cal 212.000, sustitución del catalizador 76.000, otros 35.000). Esto era para una producción bruta de 182.500 toneladas de vidrio, con una producción neta de 156.950 toneladas (producción nominal de 500 toneladas diarias). El volumen de gas residual es de unos 55.000 Nm³/hora.

Schott-Ruhrglass en Mitterteich, Alemania, ha operado una unidad de SCR desde 1989, para 6 hornos conectados a un sistema de SCR, con un volumen total de gases residuales de 60.000 Nm³/hora. Los costes reportados en 1990 incluían costes de inversión de 1,5 – 2,0 millones de Euros y costes operativos de 450.000 euros (incluidos amortización e intereses, unos 100.000 euros), ambos costes para la etapa de SCR solamente, excluyendo el tratamiento del polvo y los gases ácidos [tm32 Beerkens]. Los costes de inversión de la SCR se han reducido en años recientes debido a la mayor competencia existente entre los proveedores.

PLM en Bad Münder, Alemania, ha operado un sistema de SCR conectada a 4 hornos de vidrio para envases desde 1994. Los costes de explotación son de 1,6 euros (suponiendo 1 euro = 2DM, amortización a 13 años e interés del 8 %) por tonelada de vidrio producido, lo que equivale a 450.000 euros anuales. En 1994, el coste de inversión fue de 2,3 millones de euros. Ambos costes hacen referencia a la SCR únicamente.

En un informe a la Oficina Europea de Prevención y Control Integrado de la Contaminación [tm32 Beerkens] se dan estimaciones de costes para una serie de hornos. Estas cifras se resumen a continuación y se comparan con otras técnicas en la Sección 4.4.2.9. Los costes indicados no incluyen intereses o amortización. Los costes de inversión se estiman con una precisión de más o menos 15%, y los costes operativos de más o menos 30%.

Tamaño, toneladas/día	Volumen de Gas Nm ³ /hora	Coste de inversión (x1000) euros	Costes operativos (x1000) euros anuales
50 t/d Envases	6.400	990	74
100 t/d Envases	11.120	1.500	108
300 t/d Envases	23.000	2.420	200
450 t/d Envases	33.350	3.100	260
600 t/d Flotado	70.000	4.550	470
100 t/d Fibra de Vidrio	12.000	2.000 – 3.000	139

Tabla 4.10: Costes de la SCR con precipitadores electrostáticos y lavado de gases ácidos [tm32 Beerkens]

Aplicabilidad

En principio, la SCR puede aplicarse a la mayoría de procesos en la Industria del Vidrio, y tanto a plantas nuevas como ya existentes. No obstante, hay una serie de aspectos que limitan seriamente la aplicabilidad de la técnica en ciertos casos. Estos aspectos se resumen a continuación.

La técnica no se ha empleado en plantas con combustión a fuel-oil pesado debido a los elevados niveles de SO₂ en el gas de combustión, que puede producir la formación de bisulfato amónico y el envenenamiento del catalizador. Esto es también potencialmente cierto para hornos con combustión a gas con elevados niveles de sulfato. Uno de los aspectos clave de los costes de la SCR es la vida útil del catalizador, que puede reducirse significativamente en caso de envenenamiento. En [tm47 French Submission] se

reporta un ensayo con un motor diesel que utilizaba fuel-oil pesado con un elevado contenido de azufre y SCR. Se mostró una reducción del 90% sin problemas operativos durante más de 2500 horas de funcionamiento.

La SCR se ha utilizado en la industria de producción de energía para tratar gases con elevadas concentraciones de SO₂, y el problema ha sido resuelto mediante el uso de técnicas eficaces de desulfurización de los gases de combustión antes del equipo. La eficacia de eliminación de SO₂ de los sistemas de lavado de gases actualmente utilizados en la Industria del Vidrio es improbable que sea adecuada para la SCR. Una eliminación más eficaz de SO₂ aumentaría sustancialmente los costes y haría difícil reciclar el material recogido al horno, creando con ello una nueva corriente residual. En la Sección 4.4.3 se da más información.

La SCR requiere mucho espacio, particularmente si las unidades de lavado y de filtro no están instaladas. En algunas plantas existentes en las que el espacio es limitado, esto puede aumentar sustancialmente el coste de la técnica, o en algunos casos hacer que sea prohibitivamente cara.

Generalmente no es viable usar la SCR en combinación con un sistema de filtros de mangas, ya que la baja temperatura operativa del filtro del bolsa hace normalmente necesario recalentar el gas residual. El coste de recalentar el gas a unos 400 °C es normalmente prohibitivamente caro. [tm32 Beerkens] lo estima en 800000 euros al año para 65000 Nm³/hora. Por consiguiente, si una instalación existente está equipada con filtros de mangas, tendrían que sustituirse con PE, o recalentar el gas, y ambas opciones aumentarían mucho el coste. Análogamente, la SCR requiere asimismo niveles de polvo muy bajos (<15 mg/Nm³ o preferiblemente < 10 mg/Nm³)

La técnica ha sido probada para determinados vidrios que contienen elevados niveles de boro (tubos farmacéuticos de vidrio de borosilicato, Schott-Ruhrglas, Mitterteich), pero nunca ha sido probada para lana de vidrio o fibra de vidrio de filamentos continuos. El problema potencial de estos procesos es la presencia de sustancias volátiles que contienen boro (particularmente ácido bórico) en los gases residuales. Estas sustancias pueden condensar formando sales y sustancias ácidas a 60 °C, y a las temperaturas de la SCR suelen estar presentes en cantidades significativas. Estas materias pueden afectar gravemente la eficacia del catalizador y serían difíciles de eliminar por soplado del hollín.

Consideraciones Asociadas

Para la Industria del Vidrio, aparte de los límites de aplicabilidad arriba descritos, la consideración primordial para la aplicación de la SCR es su coste en comparación con otras técnicas. La Sección 4.4.2.9 compara los costes de las diversas técnicas para la reducción de NOx. La SCR es una técnica relativamente cara en comparación con las medidas primarias (incluido el proceso FENIX), el Proceso 3R de Pilkington, la SNCR y en algunas aplicaciones la oxicombustión. Todas estas técnicas se han desarrollado sustancialmente en años recientes, y en muchas aplicaciones en las que las emisiones sin eliminación estén por debajo de 2500 mg/Nm³ (es decir, no se agregue nitrógeno ni se requieran temperaturas muy altas), pueden conseguirse niveles de emisiones cercanos a los obtenidos con la SCR. Por consiguiente, excepto en el caso en que las concentraciones de entrada sean muy altas, la SCR no es considerada generalmente por la Industria del Vidrio como la técnica más eficaz desde el punto de vista de costes.

El reactivo NH₃ se inyecta a presión en el gas de combustión antes del lecho de catalizador, como amoniaco líquido o en forma de solución acuosa (normalmente un 25%). El NH₃ líquido es una sustancia peligrosa, y hay importantes costes y aspectos de seguridad asociados con su almacenamiento y uso. La mayoría de procesos de vidrio no utilizan estos tipos de productos químicos, prefiriéndose el uso de una solución acuosa, que también requiere un cuidadoso almacenamiento y manipulación.

Las emisiones de amoniaco son un elemento de preocupación y pueden ser un factor limitante de la eficacia de la técnica. Muchas de las unidades actualmente en funcionamiento muestran que es posible mantener las emisiones de NH₃ por debajo de 10 mg/Nm³ y seguir manteniendo buenos niveles de eficacia.

<u>Ventajas:</u>
<ul style="list-style-type: none"> Muy alta eficacia de reducción de NOx. Reduce el NOx de todas las fuentes del horno, no sólo el NOx térmico. Puede formar parte de un sistema integrado de control de la contaminación atmosférica. Muchos ejemplos dentro de la Industria del Vidrio y en otros sectores industriales. Los proveedores suelen ofrecer garantías de eficacia.
<u>Desventajas:</u>
<ul style="list-style-type: none"> Hay aspectos técnicos aún por resolver en algunas aplicaciones (Ej. plantas con combustión a fuel-oil y algunos vidrios que contienen boro). Se consume y emite amoniaco, y el almacenamiento y la manipulación de esta sustancia plantea problemas medioambientales y de seguridad. El sistema consume considerable energía. Debe instalarse con eliminación de polvo y lavado de gases ácidos, ya que se requieren bajos niveles de polvo y de SO₂. Coste de inversión relativamente alto, particularmente para plantas pequeñas. Altos requisitos de espacio. Su relativa ventaja de coste se ve erosionada por los desarrollos en otras técnicas más baratas. Sigue habiendo dudas sobre las vidas útiles de los catalizadores. La temperatura operativa limita las posibilidades de recuperación de calor. Puede requerirse enfriamiento por gas para hornos recuperativos.

Tabla 4.11: Principales ventajas y desventajas de la SCR

Instalaciones de Ejemplo

Nombre y ubicación de la planta	Volumen gas Nm ³ /hora	Entrada mg/Nm ³	Salida mg/Nm ³	% Reducción	NH ₃ mg/Nm ³
Schott-Ruhrglas, Mitterteich, Alemania (Vidrio de borosilicato)	60.000	5.000	1.500	70	<20
Euroglas SA, Homburg, Francia (Vidrio flotado)	55.000	2.000	500	75	<5
PLM Bad Münder, Alemania (Vidrio para envases)	60.000	1.300	<400	>70	<2
Schott Glas GmbH, Mainz, Alemania (Vidrio para TV)	30.000	3.500 – 4.500	650 - 850	70 - 80	<10
Philips, Achen, Alemania (Vidrio para TV)	30.000	4.000 – 5.500	450 - 850	75 - 85	<30
Oberland Glas AG, Neuburg, Alemania (Vidrio para envases: la unidad de SCR ya no se utiliza, al cumplirse los límites legales con medias primarias)	50.000	1.100	<500	55	<30

4.4.2.8. Reducción No Catalítica Selectiva (SNCR)

Descripción de la Técnica

En el proceso de reducción no catalítica selectiva (conocida también como Eliminación Térmica de NOx), los óxidos de nitrógeno en el gas de combustión se reducen a nitrógeno mediante reacción a alta temperatura con amoniaco o urea. En la Industria del Vidrio sólo se utiliza amoniaco y amoniaco acuoso. Las reacciones químicas involucradas son las mismas descritas para la SCR en la Sección 4.4.2.7 anterior. No obstante, las reacciones se producen a temperatura más alta sin necesidad de catalizador. La temperatura operativa es del orden de 800 – 1.100 °C, pero la mayor eficacia se da alrededor de 950 °C. En algunas aplicaciones se ha sugerido que la adición de hidrógeno al gas residual puede facilitar la reacción a temperaturas más bajas. En la SNCR, el amoniaco se inyecta más cerca del horno que en la SCR, y normalmente se utiliza un gas portador. La eficacia de la técnica depende de una serie de factores, los principales son:

- ✓ temperatura;
- ✓ concentración inicial de NOx;
- ✓ mezcla uniforme del reactivo y de los gases de combustión;
- ✓ relación entre amoniaco y NOx; y
- ✓ tiempo de reacción (se requieren de 1 a 2 segundos).

En particular, es importante asegurar el rango de temperatura correcto (una temperatura demasiado baja produce desprendimiento de amoniaco y una menor eficacia, si es demasiado alta puede producirse más NOx) y que el reactivo esté uniformemente distribuido en el gas de combustión. A la hora de conseguir la temperatura correcta, la posición del inyector de amoniaco es crítica, pero la zona con la temperatura correcta puede no ser accesible o cambiar con las condiciones operativas (Ej. cambios de mezcla). Este cambio en la posición de la zona de temperatura correcta puede preverse mediante la instalación de más inyectores de amoniaco, pero esto aumenta el coste de inversión y depende de la accesibilidad. Puede conseguirse una distribución uniforme mediante un buen diseño de los conductos, y si es necesario mediante el uso de placas de pantalla u otros dispositivos de corrección del flujo.

La técnica adolece de los mismos problemas operativos potenciales que la SCR, es decir, desprendimiento de amoniaco, formación de N₂O (mayor con urea) y formación de bisulfato amónico. La formación de bisulfato amónico puede ser mayor que en la SCR, ya que la temperatura operativa requiere la inyección antes de cualquier filtro o sistema de lavado. No hay catalizador presente, pero el bisulfato amónico puede causar problemas de aglomeración.

Eficacia Medioambiental

Para la SNCR se indican reducciones normales de NOx del 30 – 70%, aunque en algunas aplicaciones se han reportado cifras superiores al 80%. El principal elemento que influirá será el grado en que pueden optimizarse los factores de los que depende la eficacia. En un proceso moderno y bien controlado en el que pueden conseguirse condiciones óptimas, es posible obtener reducciones del 50 - 75 %. En general, la técnica es más fácil de aplicar con hornos de recuperación que con hornos regenerativos.

La concentración final de las emisiones dependerá de la concentración inicial, por lo que se obtendrán los mejores resultados si se combina la técnica con medidas de reducción primarias. Por ejemplo, una concentración inicial de 1.100 mg/Nm³ puede reducirse a un valor entre 275 y 770 mg/Nm³, según las condiciones de proceso. Una concentración inicial elevada de 4.000 mg/Nm³ podría reducirse a un valor entre 1.000 y 2.800 mg/Nm³.

En [tm35 SNCR] Vetropack reporta una reducción, a 220 toneladas diarias, desde 800 hasta aproximadamente 200 mg/Nm³ y, a 340 toneladas diarias, una reducción de aproximadamente un 60 %. En ambos casos, el desprendimiento de amoniaco fue bajo.

Consideraciones Económicas

En un informe a la Oficina Europea de Prevención y Control Integrado de la Contaminación [tm32 Beerkens] se hacen estimaciones de costes para una serie de hornos. Estas cifras se resumen a continuación y se comparan con otras técnicas en la Sección 4.4.2.9. Los costes indicados no incluyen intereses ni amortización. Los costes de inversión se estiman con una precisión de más o menos 15%, y los costes operativos de más o menos 30%.

Tamaño toneladas/día	Volumen de Gas Nm ³ /hora	Coste de inversión (x1000) euros	Coste operativo (x1000) euros anuales
50 t/d Envases	6.400	190	23
100 t/d Envases	11.120	280	28
300 t/d Envases	23.000	450	73
450 t/d Envases	33.350	575	100
600 t/d Flotado	70.000	1.350	225

Tabla 4.12: Costes de la SNCR [tm32 Beerkens]

Aplicabilidad

En principio, la técnica es aplicable a todos los procesos de vidrio, incluidas plantas nuevas y existentes. La SNCR comporta menores costes de inversión y requiere menos espacio que la SCR, lo que la hace más atractiva para procesos en los que el espacio es limitado. Asimismo, la técnica puede utilizarse sin equipo de lavado de gases y de aspiración de polvo. Si se dan las condiciones de proceso correctas, la SNCR es más fácil de incorporar a las plantas existentes que la SCR. No obstante, la técnica tiene asimismo algunos factores que limitan su aplicabilidad dentro de la Industria del Vidrio. El más importante de ellos es si el reactivo puede introducirse en un punto del sistema de gases residuales en el que pueda mantenerse la temperatura correcta durante un tiempo de reacción adecuado. Esto es de particular relevancia en plantas existentes y para hornos regenerativos.

En las plantas existentes, la zona en la que se produce la temperatura correcta puede ser de difícil acceso o estar en una posición en la que el flujo de gas hace difícil conseguir una buena mezcla con el reactivo. En muchos casos, estos problemas pueden superarse o mitigarse, pero pueden aumentar significativamente los costes y puede poner en compromiso la eficacia de la reducción de NOx. En los hornos regenerativos, el rango de temperatura correcto ocurre normalmente dentro de los regeneradores, lo que hace muy difícil inyectar el amoniaco de forma eficaz. Este problema puede enfocarse utilizando regeneradores partidos e inyectando el amoniaco en la conexión. Los regeneradores partidos pueden incluirse en el diseño de una nueva planta, pero para los procesos existentes, la partición de los regeneradores puede suponer costes sustanciales y sólo puede acometerse en una reconstrucción.

En la práctica, el uso de la SNCR en hornos regenerativos existentes es muy improbable, ya los costes de las dificultades asociadas llevan casi siempre a las empresas a escoger un método alternativo de reducir las emisiones de NOx. En los hornos de recuperación pequeños, los costes relativos de la SNCR son bastante altos y, en muchos casos, la industria se inclina por otras medidas de control más efectivas desde el punto de vista económico. No obstante, esto dependerá del nivel de eficacia requerido.

Consideraciones Asociadas

Ventajas:

- La SNCR puede conseguir buenas eficacias de reducción de NOx si se dan las condiciones correctas.
- Bajo coste de inversión en comparación con algunas alternativas.
- No requiere catalizador.
- Bajo consumo energético.

Desventajas:

- La inyección de amoniaco dentro del margen de temperatura correcto es esencial, aunque en ocasiones es difícil o impracticable de lograr (particularmente para hornos regenerativos).
- Fuera del rango de temperatura operativo, pueden producirse emisiones de NH₃ o un aumento de las emisiones de NOx.
- Una mezcla uniforme es importante y puede ser difícil de lograr.
- Se consume y emite amoniaco, cuyo almacenamiento y manipulación plantea problemas medioambientales y de seguridad.
- Posibles daños en el material refractario de los regeneradores.

Tabla 4.13: Principales ventajas y desventajas de la SNCR

Instalaciones de Ejemplo

- Vetropack AG, Bülach, Suiza – Vidrio para envases.
- PPG Fresno, California, EE.UU – Vidrio flotado.
- Schott Glas, Mainz, Alemania – Vidrio especial.
- Henkel, Dusseldorf, Alemania – Vidrio soluble.
- Osram, Augsburg, Alemania – Vidrio para iluminación.

4.4.2.9. Comparación de los Costes de las Técnicas de Eliminación de NOx

Esta sección compara los costes de las principales técnicas de eliminación de NOx descritas en este capítulo, así como los costes de un sistema de filtro y de lavado de gases ácidos. La información aquí presentada se basa en gran medida en un informe preparado para la Oficina Europea de Prevención y Control Integrado de la Contaminación [tm32 Beerken]. Hay una amplia gama de aspectos específicos de la instalación que es imposible incluir en un informe de este tipo, como por ejemplo:

- ✓ Precios de la energía (particularmente la electricidad).
- ✓ Impuestos.
- ✓ Costes de las materias (Ej., cal, amoniaco, etc.).
- ✓ Planes de incentivación de los Estados Miembros.
- ✓ Detalles de negociaciones entre proveedores y empresas de producción.
- ✓ Costes de desecho de residuos sólidos o líquidos.
- ✓ Infraestructura de la instalación.

Los costes de una técnica particular pueden también variar ampliamente entre sectores, entre tipos de vidrio y entre hornos de distintos tamaños. No es posible dentro del ámbito de este documento cubrir todas las posibles combinaciones de tamaños y tipos de vidrio. Asimismo, para ciertas partes de la Industria del Vidrio hay muy poca información disponible públicamente. Por consiguiente, la información aquí presentada sólo puede considerarse como una guía indicativa general basada en la información disponible y con un grado de interpretación y extrapolación. Un estudio en profundidad y con mayor detalle requeriría mucho tiempo y poder disponer de más información. Esto no se considera posible dentro del ámbito de este trabajo.

Se consideran cinco casos típicos, todos ellos hornos de vidrio sodocálcico, y cuando es posible se propone información orientativa para un horno de fibra de vidrio de filamentos continuos. Estos ejemplos se han seleccionado dado que representan la mayor parte de la producción de vidrio y debido a que la mayoría de la información disponible es para hornos de estos tipos. Los ejemplos dados son para diversas escalas de producción, pero debe tenerse precaución a la hora de efectuar comparaciones directas con otros tipos de producción de vidrio. Por ejemplo, un horno de vidrio para envases de 100 toneladas diarias que utilice un 48% de vidrio recuperado será considerablemente menor que un horno de fibra de vidrio de filamentos continuos de 100 toneladas diarias. Por ello, se indican los volúmenes de gases de combustión de los ejemplos, que facilitan las comparaciones con otros sectores.

Los cinco casos son:

1. Producción de vidrio para envases, 50 toneladas de vidrio fundido / día (recuperación).
2. Producción de vidrio para envases, 100 toneladas de vidrio fundido / día (recuperación).

3. Producción de vidrio para envases, 300 toneladas de vidrio fundido / día (regenerativo).
4. Producción de vidrio para envases, 450 toneladas de vidrio fundido / día (regenerativo).
5. Producción de vidrio flotado, 600 toneladas de vidrio fundido / día (regenerativo).

Las técnicas consideradas son:

1. Sistemas de combustión bajos en NOx y control de combustión de bajo nivel de NOx.
2. SCR excluyendo los costes de preacondicionamiento de los gases de combustión (o sea, excluidos filtro y lavador).
3. SNCR.
4. Proceso 3R de Pilkington (excluidos costes de licencia y sin partida para la modificación del material refractario de los regeneradores).
5. Oxicombustión 100%.
6. SCR más preacondicionamiento de los gases de combustión (o sea, incluidos filtro y lavador).
7. Filtro + lavador para la reducción de emisiones de partículas y gases ácidos.

Los costes de la SCR con y sin preacondicionamiento de gases se indican para dar una idea de los costes de cualquier aplicación en la que el filtro y el lavador ya estén instalados. No obstante, es evidente que habrá costes asociados con la modernización de plantas ya existentes. Los costes de inversión y operativos del filtro y del lavador se consideran indicativos tanto de los filtros de mangas como de los precipitadores electrostáticos dentro del margen de confianza dado.

La tabla siguiente da los costes de inversión indicativos (más o menos 15%) de las diversas técnicas para los casos de ejemplo. En las secciones específicas de este Capítulo se facilita información adicional. Los costes no incluyen intereses u otros costes de financiación. Los costes de inversión de la producción de oxígeno se incluyen en los costes operativos. Todas las cifras son en euros. El coste negativo de la oxicombustión es debido a los ahorros en el sistema de recuperadores o regeneradores. Como se indica en la Sección 4.4.2.5, para los sistemas de regeneradores esto es aplicable principalmente a plantas nuevas y puede compensarse en cierto grado si se requieren refractarios más caros para el horno. El coste del proceso 3R dependerá en gran medida de si está previsto efectuar reparaciones en los regeneradores o no. Este aspecto se discute en la Sección 4.4.2.6.1. En general, no cabe esperar reparaciones en las plantas de vidrio flotado, pero podría existir la posibilidad en algunos hornos de vidrio para envases o vidrio doméstico, aunque se considera extremadamente improbable.

Coste de inversión en euros	50 t./día	100 t./día	300 t./día	450 t./día	600 t./día
	envases	envases	envases	envases	flotado
SCR	430.000	615.000	1.000.000	1.300.000	1.800.000
SNCR	190.000	280.000	450.000	575.000	1.350.000
Bajo nivel de NOx	100.000	100.000	180.000	200.000	550.000
Oxicombustión	-200.000	-300.000	-1.350.000	-1.750.000	-4.800.000
3R con reparaciones, etc.			270.000	350.000	680.000
3R sin reparaciones			140.000	170.000	260.000
SCR + filtro	990.000	1.500.000	2.420.000	3.100.000	4.550.000
Filtro + lavado	565.000	875.000	1.420.000	1.820.000	2.750.000
Gas de combustión, Nm ³ /hr	6.400	11.120	23.000	33.350	70.000

Tabla 4.14: Costes de inversión de las técnicas de eliminación [tm32 Beerkens]

La Tabla 4.15 muestra los costes operativos indicativos (más o menos 30%) de las diversas técnicas

para los casos de ejemplo. En las secciones específicas de este Capítulo se facilita mayor información. Los costes incluyen reactivos (Ej. amoníaco y cal), la medición de los gases de combustión, el mantenimiento, y el coste adicional de energía de ventiladores, etc. No están incluidos ni los intereses de financiación ni la amortización. Para la fusión con oxicombustión, el coste del oxígeno considerado (incluidos costes de inversión y energía) es de 0,055 euros/m³ para usuarios pequeños y de 0,04 euros/m³ para usuarios grandes, estas cifras son comparables a las indicadas en [tm6 NOx Ind.duVerre]. Los costes incluyen asimismo el ahorro de energía previsto para la fusión con oxicombustión. Las cifras se indican con un margen del 25 - 30% para hornos de recuperación y del 10 - 15% para hornos regenerativos.

Costes operativos anuales en euros x 1000	50 t./día	100 t./día	300 t./día	450 t./día	600 t./día	100 t./día
	envases	envases	envases	envases	flotado	fibra
SCR	42	64	123	166	330	100
SNCR	23	28	73	100	225	23 - 35 ⁽¹⁾
Bajo nivel de NOx	15	21	35	46	72	21
3R con reparaciones			185	255	285	
3R sin reparaciones			106	156	267	
Oxígeno	135	190	530	1.110	1.900	227
SCR + filtro	74	108	200	260	470	139
Filtro + lavado	37	53	89	116	186	64

Tabla 4.15: Costes operativos anuales de las técnicas de eliminación [tm32 Beerkens]

(1)Costes estimados

La tabla siguiente muestra los costes totales de cada técnica (incluida amortización a 10 años e interés del 7%) en euros por tonelada de vidrio.

Toneladas vidrio fundido/día	Gases de combustión Nm ³ /hr	Euros / tonelada de vidrio								
		Bajo nivel NOx	SCR	SNCR	3R con rep.	3R sin rep.	Oxicombustión	SCR + filtro	Filtro + lavado	
50	6.400	2,36	7,01	3,65	3,96	3,18	6,17	14,25	7,97	
100	11.120	1,34	4,98	2,35	2,87	2,20	4,06	10,2	5,52	
300	23.000	0,72	2,83	1,49	2,28	1,35	5,05	5,75	3,01	
450	33.350	0,57	2,44	1,3	2,02	1,23	5,04	4,92	2,68	
100 fibra	12.000	1	5	1,5 - 2	4 - 4,5	2,50	7 - 8	13	9	
600 flotado	70.000	0,83	2,99	2,16	1,91	1,50	5,16	5,78	3,06	

Tabla 4.16: Costes específicos de las técnicas de eliminación en euros/tonelada de vidrio

[tm32 Beerkens]

La reducción de NOx se basa en un nivel inicial de NOx de 1.600 mg/Nm³ para hornos de recuperación y de 2.000 mg/Nm³ para vidrio flotado, y las reducciones por técnicas son las siguientes: SCR (80%), SNCR (50%), bajo nivel de NOx (50%), 3R (65%) y oxicombustión (80% en peso). Los niveles de reducción de la SNCR y en particular del proceso 3R pueden ser mayores (hasta un 80% para el proceso 3R).

Los costes de la oxicombustión son especialmente difíciles de predecir y pueden variar ampliamente, según el ahorro de energía alcanzado y el coste del oxígeno. Por ejemplo, estos costes se calculan con una reducción de energía del 25 - 30 % para hornos recuperativos. En otros sectores en los que el uso de vidrio recuperado es mucho menor, podría ser del 50%. Análogamente, según las condiciones específicas de la instalación, el coste del oxígeno/m³ puede ser considerablemente menor. Esto es particularmente cierto cuando hay varios hornos en la misma instalación. La tabla siguiente da una indicación de la amplia variación en el coste por tonelada de vidrio que puede existir para dos posibles límites de costes. Hay también otros factores económicos potencialmente importantes en la elección de la fusión con oxicombustión, que se discuten en la Sección 4.4.2.5.

Toneladas/día de vidrio fundido	Costes adicionales/tonelada de vidrio fundido Oxígeno 0,03 euros/Nm ³	Costes adicionales/tonelada de vidrio fundido Oxígeno 0,06 euros/Nm ³
50	- 0,47	7,5
100	- 0,55	6,4
300	2,5	8,7
450	2,5	8,6
600	2,3	10,8

Tabla 4.17: Costes de la fusión con oxicombustión (euros/tonelada de combustible) para dos precios de oxígeno

[tm32 Beerkens]

4.4.3. Óxidos de Azufre (SOx)

El término óxidos de azufre (SOx) incluye el dióxido de azufre (SO₂) y el trióxido de azufre (SO₃), expresado como equivalente de SO₂. El dióxido de azufre es con mucho el óxido de azufre más presente en la Industria del Vidrio, y la mayor parte de la discusión que sigue hace referencia al mismo. Por debajo de unos 200 °C, el SO₃ está normalmente en forma de una neblina o vapor ácido. Las dos principales fuentes de emisiones de óxidos de azufre son la oxidación del azufre en los combustibles y la descomposición/oxidación de los compuestos de azufre en las materias primas de la mezcla.

La retención de compuestos de azufre en el vidrio es normalmente baja (<0,35 % en forma de SO₃, en la mayoría de vidrios industriales), y en general la mayoría del azufre que entra en el horno se emite a la atmósfera en forma de SOx. Algo del SOx de la corriente de gas residual reaccionará con otras sustancias para producir sulfatos, que condensan formando polvo. La cantidad de sulfato en el polvo varía según el tipo de vidrio, pero para vidrios sodocálcicos está alrededor del 98%. Este aspecto se discute con mayor detalle en la Sección 4.4.1.

En los hornos calentados eléctricamente, las emisiones de SO₂ tienden a ser muy bajas y se derivan sólo de la descomposición de las materias primas. En los cubilotes de lana de vidrio, hay una atmósfera globalmente reductora, y el azufre de las materias primas y el combustible se emite principalmente en forma de SOx y sulfuro de hidrógeno (H₂S). En las instalaciones de la UE, los gases residuales se tratan normalmente en un sistema de postcombustión, que oxida el H₂S a SO₂.

4.4.3.1. Selección de Combustible

En los procesos con combustión de fuel-oil, la principal fuente de SOx es la oxidación del azufre del combustible. La cantidad de SOx derivado de las materias primas de la mezcla varía según el tipo de vidrio pero, en general, cuando se quema fuel-oil, las emisiones de SOx del combustible son superiores a las de las materias primas de la mezcla. La forma más evidente de reducir las emisiones de SOx es reducir el contenido de azufre del combustible. El fuel-oil está disponible en varios contenidos de azufre (<1 %, <2 %, <3 % y >3 %), mientras que el gas natural está esencialmente exento de azufre. En algunos hornos de vidrio europeos se queman gasoleos con niveles de azufre de hasta un 3,5%, pero en la mayoría de Estados Miembros raramente se emplean gasoleos con más de un 2% de azufre. Con el fin de mejorar el control de acidificación en la UE, en el momento presente se están debatiendo en la UE medidas para controlar los niveles de azufre en el fuel-oil hasta el 1% o equivalente tras la eliminación. La tabla siguiente muestra algunas emisiones típicas de SOx de hornos de vidrio sodocálcico con diversas calidades de combustibles. Las cifras son sólo indicativas, y las cifras reales pueden variar significativamente.

Combustible	SOx (como SO ₂) mg/Nm ³
Gas natural	300 – 1.000
Fuel-oil 1 % de azufre	1.200 – 1.800
Fuel-oil 2 % de azufre	2.200 – 2.800

Tabla 4.18: Emisiones indicativas de SOx en los gases residuales para distintos combustibles

El uso de gas natural aumenta en la industria. Por ejemplo, casi todos los hornos de lana de vidrio que utilizan combustible fósil, la mayoría de hornos de fibra de vidrio de filamentos continuos, y alrededor del 50% de los hornos de vidrio para envases son a gas natural. No obstante, el principal factor decisivo es la diferencia de precio entre el gas y el fuel-oil. La experiencia general en la industria es que la conversión a gas natural produce emisiones más altas de NOx, en un 25 - 40%, aunque con la mayor experiencia la diferencia se va reduciendo. Este aspecto se discute con mayor detalle en la Sección 4.4.2.1 (Elección de combustible).

La conversión a un combustible con menor contenido de azufre no produce mayores costes, excepto el mayor precio del combustible. La conversión a combustión a gas requiere quemadores distintos, el sistemas de suministro de gas a los quemadores, y modificaciones en las tomas de los quemadores y de combustible. En algunos casos, las instalaciones pueden no tener acceso a un suministro de gas natural. Los precios de los diversos combustibles varían con el tiempo y entre los distintos Estados Miembros, pero en general una reducción del contenido de azufre de un 1% supone un aumento de precio del 5% aproximadamente. En la mayoría de Estados Miembros, el gas natural es más caro que el fuel-oil, pero en algunos (Ej. Reino Unido, 1998) puede ser notablemente más barato. En 1998 en Francia, los distintos precios de energía, sobre una base de 100, eran: electricidad (522); gas natural (122); fuel-oil con un 1 % de azufre (100); fuel-oil con un 2 % de azufre (94); y fuel-oil con un 3,5 % de azufre (87). En el Reino Unido en 1998, el gas natural era 20 - 30 % más barato que el fuel-oil con un 2 % de azufre.

La tabla siguiente muestra las variaciones de coste de las diversas fuentes de energía sobre la base de estimaciones a 1 de enero de 1998. Las variaciones en las cifras se expresan con la media para cada tipo de energía fijada en 100, y también se indican los precios medios reales.

	Fuel-oil pesado	Gas Natural	Electricidad
Media – base 100 (coste medio real euros/GJ)	100 (300 euros/GJ)	100 (370 euros/GJ)	100 (1310 euros/GJ)
Máximo	122 (Holanda)	150 (Suecia)	131 (Austria)
Mínimo	72 (Bélgica)	80 (Reino Unido)	64 (Finlandia)
Máximo / Mínimo	1,69	1,87	2,04
Media de la UE (Base 100 = fuel-oil pesado)	100	123	436

Tabla 4.19: Variaciones en los precios de la energía en la UE. Fuente: CPIV

Los cubilotes utilizados en la producción de lana de vidrio son calentados por coque. La variación en el contenido de azufre del coque utilizado por el sector es bastante baja (0,6 % - 0,9 %) y depende de la fuente. El SO₂ derivado del coque representa normalmente un 30 – 70% de la emisión total, según si se utiliza escoria de alto horno y residuos aglomerados con cemento. El coque bajo en azufre puede ser caro de transportar a menos que la planta esté situada cerca de una fuente que resulte conveniente, y la reducción en las emisiones no suele ser proporcional al coste. El sector no utiliza alternativas con alto contenido de azufre como coque de petróleo, y en muchos casos el contenido de azufre en el coque es todo lo reducido que la economía lo permite.

4.4.3.2. Formulación de la Mezcla

En la fabricación de vidrio convencional, los sulfatos son la fuente principal de las emisiones de SOx de las materias primas de la mezcla. Los sulfatos son los agentes de afino más ampliamente utilizados y son también importantes agentes oxidantes. El sulfato más comúnmente usado es con diferencia el sulfato sódico, que al fundirse se disocia para dar SOx gaseoso, y Na₂O, que se incorpora al vidrio. Los sulfatos de potasio y calcio también se utilizan ampliamente. En la mayoría de hornos de vidrio modernos, los niveles de sulfatos de la mezcla han sido reducidos a los niveles mínimos practicables, que varían según el tipo de vidrio. Los aspectos que rodean la reducción de los sulfatos de la mezcla se discuten en la Sección 4.4.1.1, y los aspectos relativos al reciclaje del polvo de los filtros y PE se discuten en la Sección 4.4.3.3. Las emisiones típicas asociadas con los agentes de afino y oxidación son de 200 - 800 mg/Nm³ y 0,2 – 1,4 kg/tonelada de vidrio fundido [tm29 Infomil].

En la producción de lana de roca, importantes fuentes de emisión de SO₂ (además del coque) son el uso de escoria de alto horno y de briquetas aglomeradas con cemento en la mezcla. La escoria contiene normalmente un 0,6 – 1,5% en peso de azufre, y la gran mayoría del azufre se emitirá como H₂S y SO₂. Si se utiliza un sistema de postcombustión, las emisiones se oxidarán en gran medida a SO₂. Las opciones de comprar escoria de alto horno con bajos niveles de azufre son escasas, y las plantas están normalmente limitadas por su proximidad a un número muy reducido de proveedores dentro de distancias de transporte económicas.

El porcentaje de escoria en la mezcla varía enormemente, desde casi un 100% para lana de escoria hasta cero en muchas plantas de lana de roca normal. En la mayoría de casos en los que se utiliza escoria, ésta supone alrededor del 30% de la mezcla total (excluido el coque). La única aplicación en la que su uso es necesario para el producto es en la producción de fibras blancas para aplicaciones como fibras pulverizadas con pistola y placas para techos. Estas aplicaciones representan sólo un pequeño porcentaje de la producción total del sector, pero determinadas plantas pueden producir sólo estos productos. Para una planta que utiliza alrededor de un 30% de escoria en la mezcla, las emisiones de SO₂ sin eliminación son del orden de 2 – 3 veces mayores que para una mezcla libre de escoria. Se estima [tm26 EURIMA] que, en la actualidad, aproximadamente el 30% de las plantas de lana de roca europeas utilizan escoria de alto horno.

El efecto beneficioso de eliminar el uso de escoria sobre las emisiones de SO₂ es evidente. No obstante, el uso de escoria supone una serie de ventajas, que se resumen a continuación:

- ✓ Menor uso de energía y reducción de las emisiones de CO₂, gracias a la sustitución parcial de la piedra caliza por escoria. El consumo de energía y las emisiones de CO₂ son normalmente un 5 – 15% más bajas que en una mezcla de basalto-piedra caliza.
- ✓ La mezcla contiene menos hierro, lo que reduce la frecuencia de sangrado requerida y puede mejorar los rendimientos. Hay pocas interrupciones en la producción y una ligera reducción en los residuos sólidos.
- ✓ En algunos casos, el uso de escoria parece ser que mejora las propiedades de fibrado del material fundido, que pueden contribuir a una mayor eficacia de proceso y a niveles más bajos de residuos al reducir la granalla.
- ✓ La escoria de alto horno es un material residual que si no se utiliza suele desecharse en vertedero. Además, sirve como sustituto de la roca natural y reduce la demanda de materias primas de cantera.
- ✓ La escoria es normalmente más barata que las materias primas que sustituye.

Es posible que la mayoría de las ventajas arriba descritas puedan también conseguirse mediante un mayor uso de residuos de proceso reciclados. Una evaluación específica para el centro de producción del impacto de uso de escoria sobre el entorno puede ser apropiada en algunos casos. No obstante, en una evaluación cualitativa general, las ventajas del uso de escoria es improbable que compensen las emisiones generadas. Si se requiere el uso de escoria para impartir color al producto, su uso puede minimizarse mediante el uso de residuos de proceso interno reciclado. Si se utilizan medidas secundarias de eliminación de SOx, el balance medioambiental del uso de escoria podría cambiar.

Los residuos en briquetas aglomeradas con cemento contienen normalmente alrededor de un 0,16 % de azufre y se utilizan en un porcentaje de hasta un 45% de la mezcla. Esto produce un aporte de azufre equivalente al 75% del aporte de azufre de coque con un 0,7% de azufre. Si se hace una comparación entre escoria con un 1% de azufre al 30% de la mezcla y briquetas con un 0,16% de azufre al 45% de la mezcla, la escoria contribuye unas tres veces más azufre que las briquetas. Se están realizando ensayos para

minimizar el contenido de cemento de las briquetas o sustituirlo por completo por otros sistemas aglomerantes.

4.4.3.3. Lavado Seco o Semiseco

Descripción de la Técnica

Los principios de reacción del lavado seco y semiseco son los mismos. El material reactivo (el absorbente) se introduce y se dispersa en la corriente de gas residual. Este material reacciona con las moléculas de SO_x formando un sólido, que debe ser eliminado de la corriente de gas residual mediante un sistema de precipitador electrostático o filtro de mangas. Los absorbentes escogidos para eliminar SO_x son también eficaces para eliminar otros gases ácidos, particularmente haluros (HCl y HF), pero también algunos compuestos de selenio. En algunas aplicaciones, el absorbente se inyecta directamente en conducto del gas residual, pero las técnicas son sustancialmente más eficaces si se utiliza una columna de reacción (proceso seco) o una cámara de reacción (proceso semiseco).

En el proceso seco, el absorbente es un polvo seco (normalmente Ca(OH)₂, NaHCO₃ o Na₂(CO)₂) al que puede agregarse aire para facilitar la dispersión. En el proceso semiseco, el absorbente (normalmente Na₂CO₃, CaO o Ca(OH)₂) se agrega en forma de suspensión o solución, y la evaporación de agua enfriá la corriente de gas. En otras aplicaciones industriales, el proceso semiseco arriba descrito se denomina semihúmedo. En este documento se utiliza exclusivamente el término semiseco, dado que es el término habitual en la Industria del Vidrio.

El proceso seco se encuentra más comúnmente en la industria del vidrio que el proceso semiseco. En general, el índice de eliminación depende fuertemente de la temperatura, pero en grados muy distintos para los distintos componentes del gas. Además, hay una reactividad distinta de los contaminantes del gas residual con los distintos absorbente, y pueden existir reacciones en competencia entre las distintas sustancias, especialmente si la relación entre reactivo y gases ácidos es relativamente baja. Por consiguiente, los distintos índices de absorción dependen de la cantidad específica de agente de absorción, de la composición del gas residual (contaminantes y también grado humedad y contenido de oxígeno) y la temperatura de reacción. Además, los índices de absorción debidos a la naturaleza de la reacción gas/sólido dependen en gran medida del área específica activa del absorbente y del tiempo de estancia. Por consiguiente, normalmente es necesario tener una relación sobreestequiométrica de absorbente. La cantidad específica de agente de absorción se expresa con frecuencia como la relación molar, que puede definirse de dos modos:

RM1= Relación molar entre el absorbente y el SO_x eliminado

RM2= Relación molar entre el absorbente y la entrada total de SO_x

El proceso seco o semiseco puede utilizarse en conjunción con precipitadores electrostáticos, pero con filtros de mangas los gases residuales requieren enfriamiento. El proceso de lavado más común utilizado en la Industria del Vidrio es el proceso seco en conjunción con un precipitador electrostático, con Ca(OH)₂ como absorbente y una temperatura operativa de unos 400 °C. Esto es debido a que el Ca(OH)₂ consigue un índice de eliminación relativamente bueno a esta temperatura, y debido a que 400 °C es una temperatura que puede alcanzarse fácilmente en el gas residual sin enfriamiento y está dentro del rango operativo de un precipitador electrostático.

Cuando se utilizan sistemas de filtro de mangas, la temperatura debe reducirse a menos de 200 °C. El enfriamiento puede conseguirse mediante un intercambiador de calor o con aire, y también se ve facilitado en el proceso semiseco por la evaporación de agua. A medida que disminuye la temperatura, los índices de eliminación de ciertas sustancias (en particular HCl y SO₂) disminuyen drásticamente, y tienen un mínimo en el rango entre 200 y 280 °C. A temperaturas por debajo de 200 °C, el rango operativo idóneo de los filtros de mangas y los índices de eliminación aumentan y pueden conseguirse buenos resultados para la mayoría de contaminantes, en ocasiones incluso más que a 400 °C.

Eficacia Medioambiental

Como se ha indicado anteriormente, las reducciones alcanzadas con las técnicas dependen de una serie de factores, incluida la temperatura del gas residual, la cantidad y tipo de absorbente agregado (o, más precisamente, la relación molar entre reactivo y contaminantes) y la dispersión del absorbente. La tabla y las cifras inferiores dan una estimación de las eficacias obtenidas con los distintos absorbentes y procesos. Las cifras reales alcanzadas varían de un caso a otro, se han observado cifras tanto altas como bajas.

Debido a los distintos índices de absorción que se dan dentro del aglomerado en los filtros de mangas y las distintas temperaturas operativas asociadas con PE y filtros de mangas, en la tabla 4.20 se dan cifras separadas para los dos tipos de filtro [tm41 VDI2578].

Contaminante	PE		Filtro de mangas
	~ 400 °C	200 – 280 °C	130 – 240 °C
SO ₂	50 %	10 %	10 %
SO ₃	80 %	90 %	95 %
HCl	70 %	35 %	80 %
HF	95 %	95 %	95 %
SeO ₂	90 %	70 %	90 %

Tabla 4.20: Eficacias de absorción seca para Ca(OH)₂ (Cifras orientativas)

De modo más general, una referencia [tm48 ADEME SOx] da los siguientes resultados para el proceso seco con Ca(OH)₂.

Temperatura	Índice de eliminación de SOx	
	130 – 140 °C	170 – 180 °C
Relación molar RM1 Ca/S = 1	30 %	22 %
Relación molar RM1 Ca/S = 2	50 %	40 %
Relación molar RM1 = 3	70 %	55 %

Tabla 4.21: Velocidades de eliminación de SOx para lavado seco con Ca(OH)₂

Se ha reportado un índice de eliminación del 65% en un horno flotado con lavado seco más un PE con una relación molar RM1 de 4,4, usando 180 kg/h de Ca(OH)₂ a una temperatura de unos 400 °C. Todo el polvo se recicla en el horno (ver Anexo 1, Sección 8.2, Horno FG6).

Las experiencias del proceso seco con NaHCO₃ como absorbente se resumen en la tabla siguiente para el rango de temperaturas de 300 °C a 400 °C. Los índices de eliminación indicados dependen de nuevo, en gran medida, de la temperatura y de la cantidad de absorbente empleado.

Contaminante	Índice de eliminación de SOx
SO ₂	< 50 %
SO ₃	90 %
HCl	50 – 75 %
HF	10 – 40 %
SeO ₂	30 – 60 %

Tabla 4.22: Índices de eliminación de SOx para lavado seco con Na₂CO₃

Los resultados de las experiencias más recientes con NaHCO₃ como absorbente comienzan a estar disponibles. Los índices de absorción orientativos pueden calificarse de muy buenos, especialmente para el rango inferior de temperaturas, siendo posible una eliminación de hasta el 90%.

Sólo unos pocos hornos están equipados con dispositivos de lavado semiseco. En combinación con un filtro de mangas y la aplicación de solución de Na₂CO₃ como absorbente, se han reportado índices de eliminación muy altos. Estos resultados se resumen en la tabla inferior. El 95% de eliminación de SO₂ es el máximo posible. En la práctica industrial actual, el porcentaje de reducción obtenido es normalmente del 80 – 90%.

Contaminante	Índice de eliminación de SOx
SO ₂	90 - 95 %
HCl	> 90 %
HF	> 85 %
SeO ₂	> 90 %

Tabla 4.23: Índices de eliminación de SOx para lavado semiseco con solución de Na₂CO₃

De forma más general en otras aplicaciones industriales, una referencia [tm48 ADEME SOx] da los resultados indicados en la tabla siguiente para el proceso semiseco con Ca(OH)₂. No obstante, las aplicaciones semisecas con cal no se dan comúnmente en la industria del vidrio.

	Índice de eliminación de SOx
Relación molar RM1 Ca/S =1	80 %
Relación molar RM1 Ca/S =1.5	90 %
Relación molar RM1 Ca/S =2	92 %

Tabla 4.24: Índices de eliminación de SOx para lavado semiseco con Ca(OH)₂

Se ha reportado asimismo un efecto sobre las emisiones de NOx utilizando Na₂CO₃ o NaHCO₃ en el proceso semiseco. Para NaHCO₃ el rango óptimo está situado entre 120 y 160°C, y la eficacia de la reacción depende de la relación molar SO₂/NOx. El índice de eliminación se ve favorecido por un elevado índice de SO₂/NOx. A temperaturas más elevadas, el índice de reducción de las emisiones de NOx es mucho menor. En condiciones normales representativas de la industria del vidrio, sólo se ha observado un efecto moderado sobre los índices de eliminación de NOx.

En resumen, la reducción alcanzada depende de una serie de factores relacionados con el proceso y el absorbente. En condiciones favorables pueden conseguirse elevados índices de eliminación, en el mejor de los casos hasta un 95% del SOx total expresado como SO₂. El valor del índice de eliminación de SO₂ es normalmente superior al 80%.

La concentración real de emisión o masa/tonelada de vidrio dependerá de la concentración de entrada y de la eficacia de desulfurización. Estas concentraciones de entrada dependen de los siguientes factores:

1. Nivel de azufre en el combustible.
2. Tipo de vidrio (color, estado de oxidación y contenido de azufre).
3. Requisitos tecnológicos de afino, calidad y cantidad de sulfatos.
4. Cantidad y tipo de vidrio recuperado (interno o externo, contenido de azufre y de contaminantes).
5. Composición del polvo de filtro e índice de reciclaje.
6. Condiciones de combustión (una combustión casi estequiométrica para reducción de NOx mediante medidas primarias puede aumentar el contenido de SO₂ en el gas residual bruto).

No obstante, una reducción global de las emisiones requiere la eliminación (mediante reciclaje interno o externo, o desecho en vertedero) de la corriente de residuo sólido de polvo sulfatado producida. En el caso de disposición en vertedero, el coste de tratamiento puede estimarse entre 0,5 y 1,5 euros por tonelada de vidrio, según el contexto.

En la práctica, el reciclaje completo del polvo de filtro, incluido este residuo sulfatado, se considera con gran frecuencia una opción razonable desde el punto de vista medioambiental y económico, si es técnicamente posible. En este caso, la reducción global de las emisiones de SOx está limitada (por consideraciones de balance de masa) a la reducción en origen obtenida sustituyendo el sulfato de las materias

primas por polvo de filtro. Evidentemente, se trata de una adición a otras medidas primarias apropiadas para reducir el aporte global de azufre al material fundido, mediante la optimización de los niveles de azufre en todas las materias primas de alimentación (incluido el casco de vidrio) cuando resulte practicable.

Por consiguiente, con el fin de reducir las emisiones de gases ácidos, puede ser necesario considerar una vía de desecho externa para una parte del material recogido. Una opción externa de reciclaje o reutilización sería preferible al desecho en vertedero. No obstante, en el momento presente no se ha encontrado una reutilización externa del material económicamente viable. La determinación de lo que representa la mejor protección del medio ambiente en su conjunto es en muchos casos específica de cada centro de producción y puede comportar el estudio del desecho de una cantidad de residuos sólidos. En tal caso, un balance de azufre del proceso será esencial para determinar los niveles de emisión compatibles con las MTD.

En el reciclaje del polvo de filtro en circuito cerrado, los niveles de emisiones de SOx observados actualmente son generalmente del orden de 200 - 800 mg/Nm³ para combustión de gas natural y de 800 - 1.600 mg/ Nm³ con un fuel-oil con un 1 % de S, según los factores arriba indicados. Especialmente para vidrios con un alto porcentaje de reciclaje de vidrio recuperado y una baja capacidad de asimilación de azufre (Ej. vidrios reducidos, como ciertos vidrios para envases verdes y marrones), se esperan valores en el extremo superior del rango. Existen ejemplos en la industria del vidrio en los que la eficacia neta de desulfurización está próxima a cero cuando se recicla totalmente el polvo que contiene azufre. No obstante, en estas situaciones el objetivo principal no era la desulfurización, sino la eliminación de HCl, HF, metales y polvo. No obstante, incluso en estos casos, pueden obtenerse niveles más bajos con la creación de una corriente de residuos sulfatados para desecho externo.

Así pues, al considerar la desulfurización en la industria del vidrio, es importante tener en cuenta los posibles efectos contrarios y la puesta en peligro de otros objetivos medioambientales. Los principales objetivos medioambientales en relación con la eliminación de SO₂ son:

- ✓ Elevados porcentajes de reciclaje de vidrio recuperado
- ✓ Minimización de la producción de residuos mediante reciclaje interno o externo del polvo.
- ✓ Recuperación del calor perdido.
- ✓ Reducción de otras emisiones atmosféricas.

El reciclaje del vidrio recuperado es un importante objetivo medioambiental debido al ahorro de energía, la reducción de residuos, y el menor consumo de recursos naturales. Por ejemplo, para hornos de vidrio para envases, la cuota legal en Alemania para reciclaje de vidrio recuperado es de 72%, y esta cuota se rebasa regularmente. Si se utiliza vidrio recuperado con un contenido de azufre mayor que el vidrio producido, el exceso de azufre puede producir un aumento en las emisiones de SOx. Este, por ejemplo, es el caso en vidrios reducidos verdes y marrones que utilizan vidrio recuperado de consumo. El vidrio de consumo mixto es en muchos casos la única fuente disponible de vidrio recuperado de consumo de que disponen los productores, y su contenido en azufre es mayor que el producto debido a la presencia de vidrio oxidado (vidrio al sílex, vidrio plano, algunos vidrios verdes) en la mezcla de vidrio recuperado. A mejora progresiva en la recogida selectiva de vidrio y en su clasificación mejorará la situación. No obstante, los vidrios de color oxidados, como algunos vidrios verdes, pueden también tener un mayor nivel de azufre debido a su estado de oxidación, por lo que la clasificación por color tendrá menos eficacia para reducir el contenido de azufre cuando haya una proporción considerable de dichos vidrios.

El reciclaje del polvo de filtro es también un importante objetivo por motivos de prevención de residuos. El reciclaje del polvo de filtro implica la sustitución de parte del sulfato contenido en el material de la mezcla. En principio, el polvo de filtro actúa como agente de afino, pero puede ser menos eficaz en algunos casos, y una sustitución al 100% no siempre es posible. Según los distintos tipos de vidrio (Ej. color, estado

de oxidación), la absorción de sulfato procedente del azufre del polvo de filtro varía y en ocasiones es limitada. Por lo que respecta al pleno reciclaje del polvo de filtro y en consideración de las variaciones arriba mencionadas, debe prestarse especial atención al balance de masa de azufre, y el equipo de lavado debe diseñarse para permitir una selección apropiada de agentes de lavado.

La mayoría de los sistemas de lavado de SO_x instalados operan con lavado seco con cal a una temperatura de unos 400 °C, que es la temperatura de los gases residuales obtenida en un horno de tipo regenerativo eficaz. A estas temperaturas, puede conseguirse una reducción de SO_x de alrededor del 50%. Puede alcanzarse un índice de reducción de SO_x mejorado a temperaturas de alrededor de 200 °C y con una atmósfera húmeda. Esto puede obtenerse mediante la inyección de un absorbente disuelto en agua en conexión con filtros de mangas. No obstante, esta tecnología semiseca reduce la temperatura de los gases residuales a un nivel que no es generalmente compatible con la recuperación de calor secundario o con aplicaciones posteriores que requieran temperaturas elevadas (Ej. SCR o precalentamiento del casco de vidrio). En estos casos, debe considerarse el uso del proceso semiseco convencional (o “auténtico”), aunque actualmente se dispone de muy poca experiencia con esta técnica en la Industria del Vidrio. Esto hace patente la necesidad de un análisis integrado antes de la aplicación de la desulfurización, teniendo en cuenta todos los efectos, efectos secundarios, costes y prioridades (Ej. política de acidificación, política energética, política de residuos, etc.).

Debe señalarse que altas relaciones estequiométricas de absorbente de azufre implican una mayor mezcla en el equipo de eliminación de polvo posterior. En la práctica, la mejora limitada de la absorción debe sopesarse frente a los requisitos tecnológicos que comporta, así como frente a los costes adicionales de una mayor capacidad del precipitador.

Consideraciones Económicas

Los costes de los sistemas de lavado en combinación con PE y filtros de mangas se indican en las Secciones 4.4.1.2 y 4.4.1.3. El bicarbonato sódico es considerablemente más caro que otros absorbentes, por lo que su uso ha sido menor.

En [tm29Infomil] se estima que para un flujo de 50.000 Nm³/h con un PE, los costes de inversión son de 2,5 – 3,5 millones de euros más 150.000 euros/año de costes operativos, excluyendo intereses y amortización.

Para el sector de lana de roca, los costes de inversión del lavado seco además de la técnica estándar de filtros de mangas se estiman en 0,6 – 1,4 millones de euros para una planta nueva, y de alrededor de un 20% más para una planta existente.

Aplicabilidad

En principio, las técnicas son aplicables a todos los procesos (incluso nuevos y existentes) con gases residuales que contengan sustancias ácidas. Debido a la elevada carga de polvo, la eliminación de polvo es esencial. El proceso seco se utiliza mucho más ampliamente en la Industria del Vidrio, ya que tradicionalmente ha sido la forma más eficaz desde el punto de vista de costes de alcanzar los requisitos técnicos y legales vigentes. El absorbente utilizado más comúnmente es la cal apagada, Ca(OH)₂.

Los principios de estas técnicas son comunes, independientemente del tamaño de la instalación. No obstante, debe recordarse que la escala, y por consiguiente el coste real, y posiblemente la eficacia en función del coste, variarán considerablemente de una aplicación a otra. En particular, hay una experiencia limitada con el lavado semiseco para procesos de pequeño tamaño.

Consideraciones Asociadas

Las técnicas son eficaces para eliminar determinados contaminantes gaseosos, como fluoruros, cloruros y ciertos compuestos de selenio. Las técnicas podrían tener también efecto sobre otras emisiones ácidas, pero no hay información disponible sobre los niveles de reducción.

En algunos ejemplos actuales en la industria del vidrio, una motivación importante para la instalación de las técnicas ha sido la protección del equipo de eliminación de polvo o, en algunos casos (como filamentos continuos, fritas), para la eliminación de las emisiones de fluoruros. La notable excepción a esto es la producción de lana de vidrio. En muchos casos, si no se requiere eliminación de polvo o fluoruros, sería más económico cambiar a combustión a gas en lugar de instalar estas técnicas.

Las técnicas generan una cantidad considerable de residuos sólidos, pero en muchas aplicaciones este material puede ser reciclado al horno. Pueden surgir problemas, particularmente con hornos con combustión a fuel-oil si se utilizan elevados niveles de vidrio recuperado. Si se utiliza carbonato sódico como absorbente, se recicla más fácilmente en vidrio sodocálcico, debido al requisito sustancial de sulfato sódico y carbonato sódico.

A bajos niveles de vidrio recuperado, el sulfato recogido será normalmente menos del requerido para el afino, y puede que sea posible aumentar la asimilación del azufre del polvo recogido en el vidrio (es decir, una mayor % de SO₃). Globalmente, las emisiones se reducen, y también se reduce el consumo de sulfato sódico. Si la cantidad de sulfato recogida es mayor que el sulfato requerido en la mezcla, se creará una corriente de residuo sólido para su desecho exterior. Alternativamente, si se recicla todo el material en cantidades mayores que las requeridas, el sistema se convierte en un circuito cerrado que alcanza un equilibrio dinámico en el que los únicos sumideros de azufre son el vidrio y las emisiones a la atmósfera. A niveles elevados de vidrio recuperado, el requisito de agente de afino a base de sulfato es mucho menor, y el potencial de una ulterior asimilación en el vidrio es muy bajo. Por consiguiente, a menos que se elimine una parte del polvo, las emisiones de SOx aumentan, y el beneficio global de la reducción de SOx se reduce mucho. El problema es más evidente en vidrios reducidos con elevados niveles de vidrio recuperado.

En la práctica, si esto fuera a ocurrir, los costes de desecho de un polvo que no puede reciclar puden ser muchas veces mayores que el coste de combustibles bajos en azufre (Ej. fuel-oil bajo en azufre o gas natural). Por consiguiente, en muchas circunstancias una empresa preferirá cambiar de combustible antes que crear una corriente de residuos sólidos para desecho. No obstante, una elevada diferencia de precio entre el combustible bajo en azufre (particularmente gas natural) y otros combustibles puede hacer que esta opción no sea atractiva desde el punto de vista económico.

Si se utiliza hidrato cálcico como absorbente, la mayoría de composiciones de vidrio tendrán un límite en la cantidad de calcio que puede reciclar. Normalmente pueden realizarse ajustes en la composición de la mezcla para compensar el polvo de filtro pero, en mezclas con elevados niveles de vidrio recuperado, la posibilidad de ajuste de la mezcla es limitada. En mezclas con elevado nivel de vidrio recuperado, el contenido de calcio puede ser mayor de lo que puede tolerarse en el vidrio, creando un residuo sólido. En tal caso, una solución puede ser el cambio de absorbente a carbonato bicarbonato sódico, o una mezcla de los distintos absorbentes.

En regiones que tienen elevados índices de reciclaje de vidrio recuperado, el sistema se hace aún más un circuito cerrado, ya que los niveles de los distintos componentes se acumulan en el vidrio en constante reciclaje. Esto puede ser un problema para metales, fluoruros y cloruros, así como para el azufre.

Cuando el volumen del material recogido representa un problema para el reciclaje, existen técnicas para reciclar una parte del absorbente, reduciendo el volumen global. Los problemas de formulación inconsistente del polvo recogido no son normalmente motivo de preocupación. Estos problemas pueden remediar mediante un análisis detenido, y si es necesario apilando y mezclando el material antes de su reciclaje.

En la producción de lana de roca, la reducción de SOx debe producirse tras el incinerador y antes del sistema de filtro. En algunas aplicaciones actuales, el sistema de filtro se sitúa antes del incinerador, que está diseñado para tratar un gas limpio. En estos casos, la instalación de la técnica en las plantas existentes requerirá modificaciones en el incinerador o un segundo sistema de filtro. En estos casos, la instalación de la té-

nica dependerá de la configuración del sistema de gas residual. Estas modificaciones aumentan significativamente los costes y están reflejadas en la parte alta del rango de costes discutido anteriormente. El proceso semiseco no se ha probado que sea viable económicamente en este sector.

El reciclaje del material de vuelta al horno es más difícil en la lana de roca que en otros sectores, ya que el proceso no requiere la adición de sulfatos y la asimilación de azufre en el material fundido es baja. Por consiguiente, la mayor parte del contaminante será reemitida. Esto significa que el residuo recogido debe ser desecharido como residuo sólido, o si es posible debe valorarse. La elección de absorbente para lana de roca está también limitada si se considera el reciclaje. El producto requiere niveles de sosa muy bajos, por lo que el carbonato y el bicarbonato sódico sólo pueden usarse si no se recicla el material recogido.

Una técnica alternativa ensayada en Holanda fue absorber el SO_x para producir ácido sulfúrico, que puede venderse como subproducto. La producción eficaz de ácido sulfúrico requiere que entre una elevada concentración de SO₂ en el sistema de catalizador de la planta de ácido sulfúrico. Esto era posible en este caso dado que había seis cubilotes en funcionamiento en el centro. Cinco de ellos estaban equipados con lavado seco, y todo el material recogido se reciclaba en el sexto cubilote, que estaba equipado con la planta de ácido sulfúrico. La técnica se abandonó al cabo de cinco años, ya que se registraron dificultades operativas persistentes que produjeron costes ilógicamente altos (mayores que los costes de desecho). Era un enfoque innovador, que por desgracia se reveló impracticable en este caso, y por consiguiente no puede considerarse como una técnica disponible actualmente y técnicamente probada en esta aplicación. No obstante, las dificultades técnicas podrían seguramente superarse para futuras aplicaciones, aunque la viabilidad económica de esta técnica debe ser estudiada en detalle.

En la producción de lana de roca, una alternativa al lavado seco o semiseco podría ser el uso de un sistema de lavador de Venturi. Pueden obtenerse buenas eficacias de eliminación de SO_x (90 – 95 %), pero la técnica es menos efectiva que un filtro de mangas para la eliminación de polvo. Asimismo, se recicla un residuo acuoso y el material es difícil de reciclar. Un pequeño número de instalaciones han estado utilizando esta técnica con éxito durante más de 20 años. Aunque se acepta generalmente que estos lavadores no serán la elección preferida de técnica en la actualidad, en los lugares en que existen su uso es muy posible que se enmarque en las MTD.

Ventajas

- Pueden conseguirse reducciones sustanciales en las emisiones de SO_x (según el balance específico de azufre y el reciclaje).
- Emisiones reducidas de otras sustancias (cloruros, fluoruros, compuestos de selenio, otros ácidos, como el ácido bórico).
- En la mayoría de casos, el polvo recogido puede ser reciclado, reduciendo el consumo de materias primas.

Desventajas

- La técnica consume energía.
- La técnica produce un residuo sólido que, si no puede reciclarse, aumenta los niveles de residuos. En la mayoría de casos, puede reciclarse, pero esto requiere ajustes en el proceso y puede limitar la eficacia global de reducción de SO_x.
- La técnica comporta importantes costes de inversión y operación.

Tabla 4.25: Principales ventajas y desventajas del lavado seco y semiseco

Instalaciones de Ejemplo

Hay muchos ejemplos de estas técnicas en uso, en particular el proceso seco en conjunción con un precipitador electrostático o filtro de mangas. La mayoría de los hornos en Alemania equipados con eliminación secundaria de polvo utilizan estas técnicas.

4.4.4. Fluoruros (HF) y Cloruros (HCl)

En esta sección, todos los fluoruros y cloruros gaseosos se expresan como fluoruro de hidrógeno (HF) y cloruro de hidrógeno (HCl) respectivamente. La mayoría de los haluros emitidos son en estas formas. Las emisiones de HF y HCl tienen su origen en las impurezas en las materias primas de la mezcla, o se encuentran en materiales seleccionados por contener estas sustancias en cantidades suficientes para conferir las cualidades deseadas al producto.

4.4.4.1. Reducción en Origen

En la mayoría de procesos, las emisiones de HF y HCl proceden de impurezas en las materias primas de la mezcla, que se emiten en la fusión. La mayoría de materias primas contienen niveles muy bajos de flúor o cloro, que tienen poco impacto en los niveles finales de emisión. No obstante, algunas materias primas contienen niveles significativos de estos elementos como impurezas. Las principales sustancias de este tipo son:

- ✓ Carbonato sódico sintético, que tiene un contenido residual de NaCl de aproximadamente un 0,05 – 0,15 %.
- ✓ Dolomita, que puede contener un nivel significativo de impurezas de fluoruros.
- ✓ Vidrio recuperado de consumo, que puede contener una serie de impurezas a niveles significativos, particularmente cloruros, fluoruros y metales. La cantidad de estas sustancias varía según la pureza del suministro de vidrio recuperado pero, en regiones con elevados niveles de reciclaje, las sustancias pueden acumularse gradualmente en el vidrio.
- ✓ El polvo reciclado del equipo de eliminación contiene sales, fluoruros y cloruros, que acumularse gradualmente en el vidrio.
- ✓ Algunos combustibles (Ej. coque de algunas fuentes) pueden contener cloruros.

Las emisiones de cloruros de los procesos que utilizan elevados niveles de carbonato sódico en la mezcla (principalmente vidrio sodocálcico) son considerablemente mayores que, por ejemplo, las de lana de vidrio o fibra de vidrio de filamentos continuos (ver Capítulo 3). De los procesos que no incluyen intencionalmente estas materias en la mezcla, las mayores emisiones de HCl y HF tienden a proceder de los procesos de vidrio plano y vidrio para envases.

Los niveles de emisión pueden minimizarse mediante la cuidadosa selección de las materias primas. Los aspectos que rodean los niveles de NaCl en el carbonato sódico se discuten en la Sección 4.4.1.1. Una serie de otras técnicas que se discuten en el Capítulo 4 tienen también efectos beneficiosos sobre las emisiones de HF y HCl. Se trata principalmente de aquellas técnicas que reducen la volatilización reduciendo las temperaturas, reduciendo el flujo de aire y minimizando las turbulencias. Entre estas técnicas se incluyen:

- Mayor uso de casco de vidrio, que reduce la temperatura y el consumo energético, y sustituye al carbonato sódico con sus impurezas de cloruros asociadas. Puede haber un efecto paradójico si el casco de vidrio tiene elevados niveles de HCl o HF.
- Refuerzo eléctrico.
- Mejora en el diseño y la geometría del horno.
- Posición de los quemadores.
- Reducción de la relación aire-combustible.
- Sistemas de quemadores bajos en NOx.

- Fusión con oxicombustión
- Fusión eléctrica.

Una serie de tipos de productos producidos por la Industria del Vidrio utilizan materias que contienen fluoruros para conferir propiedades específicas al material. Los principales ejemplos de ello se discuten a continuación.

Fibra de Vidrio de Filamentos Continuos

La producción de fibra de vidrio de filamentos continuos requiere por lo general fluoruro. El fluoruro se agrega para optimizar la tensión superficial y las propiedades de liquidez, para facilitar el fibrado y minimizar las roturas de los filamentos. Estos son factores importantes en el comportamiento económico y medioambiental del proceso. Un elevado índice de rotura conduce a un menor rendimiento y a un aumento de los residuos. La principal fuente de adición de fluoruro es normalmente el espato flúor (CaF_2), aunque puede haber niveles significativos en el caolín (silicato de alúmina).

Se han hecho muchos esfuerzos por desarrollar formulaciones sin adición de fluoruros, y en algunos casos ha habido éxito. Algunas empresas han desarrollado la metodología para utilizar formulaciones de mezcla sin fluoruros en muchos de sus hornos. Otra empresa ha desarrollado una forma similar de utilizar una mezcla sin fluoruro ni boro, y se han conseguido emisiones de polvo por debajo de 50 mg/Nm³ y emisiones de HF del orden de 10 - 50 mg/Nm³. La optimización de estas técnicas puede requerir modificaciones en el diseño del horno, y puede aplicarse con la máxima eficacia en una reconstrucción del horno.

Los avances logrados en vidrios bajos en fluoruro y en boro son el resultado de un costoso trabajo de desarrollo, y la tecnología es guardada celosamente por las empresas que la han desarrollado. Por lo tanto, la técnica no se halla disponible de forma inmediata a todos los fabricantes. También, para nuevos productos con cambios en la formulación, es necesario realizar largos y costosos procedimientos de registro de los productos.

Fabricación de Fritas

Las emisiones de fluoruros están directamente relacionadas con el uso de compuestos de fluoruros en la mezcla. Los fluoruros se utilizan principalmente en la producción de fritas de esmalte y no están normalmente presentes de forma significativa en las materias primas utilizadas para la fabricación de fritas cerámicas. Algunos productores de fritas cerámicas pueden, periódicamente, fabricar pequeñas cantidades de fritas de esmalte en los hornos de fritas cerámicas, originando emisiones de fluoruros, pero esto constituye sólo un pequeño porcentaje de la producción total de dichos productores. La emisión de fluoruros es probablemente el impacto medioambiental más significativo de la producción de fritas de esmalte.

Los fluoruros confieren propiedades únicas a la frita, como una mayor resistencia térmica y química, y un menor riesgo de formación de burbujas en el recubrimiento de esmalte. Se agregan a la mezcla en forma de espato flúor, fluorosilicato, criolita o fluorosilicato sódico. La mayoría de productores ofrecen actualmente esmaltes sin fluoruros o bajos en fluoruros, y la disponibilidad de estos productos va en aumento. En el momento presente, los productos sin fluoruros representan menos del 10% de la producción, y los productos bajos en fluoruros alrededor del 30%. Generalmente, el fluoruro de la mezcla no podrá reducirse suficientemente para conseguir niveles de emisiones comparables con las técnicas de lavado u otros tipos de fritas.

Vidrios Opacos

Los vidrios opacos se producen en los Sectores de Vidrio Doméstico, Especial, ocasionalmente, en los Sectores de Vidrio para envases. La adición de fluoruro causa la cristalización en el vidrio, lo que da la característica de un aspecto lechoso y opaco. La mayoría de instalaciones que producen estos produc-

tos utilizan técnicas de lavado seco para tratar las emisiones de HF. No se han encontrado alternativas prácticas que produzcan una calidad comparable. En muchos casos, el vidrio opaco se funde en hornos eléctricos de parte superior fría. Esto reduce las emisiones, ya que una parte considerable del fluoruro se absorbe en la capa superficial de la mezcla y globalmente se necesita menos fluoruro. Asimismo, el uso de la fusión eléctrica reduce enormemente el volumen de gas residual a tratar.

El Sector de Vidrio Especial produce asimismo vidrio corona (crown-glass) al flúor, que es un producto óptico con un contenido muy alto de fluoruro. El nivel de producción de este vidrio es muy bajo, y en la UE se realiza siempre con tratamiento del gas residual.

En general, las medidas para conseguir reducciones en origen son preferibles al tratamiento de los gases residuales. Con los vidrios que contienen flúor, las medidas para reducir los niveles de flúor pueden suponer restricciones graves en las condiciones operativas y requerir sustanciales recursos de desarrollo. Cuando la legislación requiere reducciones en las emisiones, muchos fabricantes se inclinan por el tratamiento del gas residual, y en particular por el lavado seco.

4.4.4.2. Técnicas de Lavado

Las principales técnicas de lavado aplicables a estas emisiones son el lavado seco y semiseco. Estas técnicas y los niveles de emisiones alcanzables se discuten en la Sección 4.4.3.3 anterior. La elección de absorbente es importante, y en ocasiones hay una alternativa entre la reducción de SO₂ y la reducción de HF y HCl. En particular, hay una relación de competencia entre HCl/HF y SO₂ con el carbonato sódico. La elección óptima dependerá de una serie de aspectos, incluidos los niveles relativos de diversos contaminantes en el gas residual.

Otra técnica que podría ser técnica y económicamente viable para procesos a muy pequeña escala (como algunos hornos de fritas) es el lavado húmedo, utilizando un lavador de lecho lleno con circulación de agua o preferiblemente una solución alcalina. El principal inconveniente de este enfoque es que se genera una corriente residual acuosa.

4.4.5. Óxidos de Carbono

Los óxidos de carbono son el dióxido de carbono (CO₂) y el monóxido de carbono (CO). El monóxido de carbono se origina como producto de combustión incompleta y es raramente emitido por las instalaciones de la Industria del Vidrio a un nivel que cause preocupación medioambiental. Hay niveles significativos en los cubilotes de lana de roca, pero la mayoría de plantas disponen de un sistema de postcombustión para oxidar las emisiones antes de su liberación a la atmósfera. El dióxido de carbono se origina de la combustión de combustibles fósiles u otros compuestos orgánicos, y de la descomposición de las materias primas de la mezcla que contienen carbonatos.

Los carbonatos como el carbonato sódico y la piedra caliza son las principales fuentes de óxidos de metales alcalinos y de óxidos de metales alcalinotérreos en la fabricación de vidrio. Las únicas fuentes alternativas reales de estos óxidos son los residuos de consumo y los residuos de proceso. Esto es vidrio recuperado para los procesos de vidrio, y residuos de proceso, productos reciclados y escoria (lana de roca sólo) para lana mineral. Los aspectos característicos de estos materiales se discuten en otra sección de este documento, pero generalmente el factor principal que limita su uso es la disponibilidad de cantidades adecuadas de materiales de calidad suficiente y consistencia de suministro. El uso elevado de estos materiales está generalmente limitado a vidrio para envases y lana de roca.

El dióxido de carbono tiene asociados efectos medioambientales bien conocidos, pero no es una de las principales sustancias contaminantes listadas en el anexo III de la Directiva 96/61/CE. El uso creciente de materias primas recicladas en la Industria del Vidrio está impulsado por la necesidad de ahorrar energía y reducir residuos, y su efecto sobre la sustitución de sustancias carbonosas es un beneficio añadido. Análogamente, la reducción en las emisiones de CO₂ derivadas del menor uso de combustible está impul-

sada por la necesidad de reducir el consumo energético y los costes operativos, así como por la presión para reducir las emisiones de NOx.

Muchas de las técnicas discutidas en este capítulo tienen importantes implicaciones para las emisiones de CO₂, pero no se presentan otras técnicas para su consideración en la determinación de las MTD en las instalaciones de la Industria del Vidrio, más allá de las consideradas para reducción del consumo energético y de otros contaminantes.

4.5. Técnicas para Controlar las Emisiones a la Atmósfera de las Actividades no relacionadas con la Fusión

Esta sección cubre aquellas actividades que no están relacionadas con la fusión o la manipulación de materias. Estas actividades incluyen el moldeo de productos y las actividades realizadas en los productos que generalmente se considera que forman parte del proceso principal. En la mayoría de actividades de la Industria del Vidrio, la fusión de las materias primas es la actividad primordial realizada, por lo que las actividades posteriores se denominan en este documento actividades “de acabado”.

Debido a la naturaleza muy específica de las actividades de acabado, la discusión se presenta ordenada por sectores.

4.5.1. Vidrio para Envases

La principal fuente de emisiones a la atmósfera de las actividades no relacionadas con la fusión es la operación de aplicación de capas en caliente. El recubrimiento, una capa muy fina de óxido metálico, se aplica pasando los envases calientes desde la máquina de moldeo a través de una campana que contiene vapores de compuestos de estaño o titanio. Las sustancias más comunes utilizadas son el tetracloruro de estaño anhidro (SnCl₄), el tetracloruro de titanio anhidro (TiCl₄), y el cloruro de monobutilestaño (C₄H₉SnCl₃). Las emisiones consisten en HCl, oxicloruros, óxidos de estaño y titanio (SnO₂, TiO₂) en forma de partículas finas, y materiales de recubrimiento sin reaccionar. También pueden producirse emisiones menores de COV de las operaciones de recubrimiento en frío. Estas emisiones no se consideran muy significativas y no se discuten más en este documento.

El primer paso en la reducción de las emisiones es minimizar el uso del recubrimiento de forma compatible con las especificaciones del producto. El uso del material puede optimizarse asegurando una buena hermeticidad de las zonas de aplicación para minimizar las pérdidas.

Actualmente hay cuatro opciones para el tratamiento del gas residual:

- (a) Extraerlo y emitirlo directamente a la atmósfera asegurando una buena dispersión.
- (b) Extraerlo y tratarlo con técnicas secundarias, como lavado húmedo.
- (c) Combinar el gas residual con el gas residual del horno.
- (d) Combinar el gas residual con el aire de combustión del horno.

La opción (a) no hace nada por reducir las emisiones, por lo que no se considerará aquí. No obstante, si las emisiones son muy bajas, este enfoque puede considerarse apropiado en determinadas circunstancias. La opción (d) puede limitar algunos de los controles primarios para minimizar las emisiones de NOx y polvo, y aunque no es probable que sean significativos, también deben tenerse en cuenta los efectos sobre la composición química del vidrio. No hay ejemplos conocidos de este enfoque, pero puede ser apropiado en determinadas circunstancias.

La opción (c) puede ser apropiada cuando se aplique eliminación secundaria al gas residual del horno. Si el material recogido se recicla, deberán considerarse los efectos de los metales en el vidrio y la

acumulación de cloruro en el sistema. Estas consideraciones pueden limitar el reciclaje del polvo en algunos casos. Si no se aplica eliminación secundaria, este enfoque sólo representa una dilución de las emisiones.

Como se ha discutido en otras partes de este documento, los lavadores húmedos pueden ser eficaces para reducir las emisiones gaseosas, pero su eficacia para tratar polvos finos está limitada por la caída de presión a lo largo del sistema. La eficacia dependerá de la composición de entrada, pero un lavado de una sola etapa puede ser suficiente para conseguir el cumplimiento de los requisitos locales. Si se desean mayores reducciones, puede aplicarse un filtro de mangas seguido de un lavado de lecho relleno, o un lavador Venturi seguido de un lavador de lecho relleno. Cabe esperar que estas técnicas reduzcan el HCl a menos de 10 mg/Nm³, las partículas a 5 - 10 mg/Nm³, y los metales totales a 1 - 5 mg/Nm³. Cuando hay HCl presente en forma de aerosol, cabe esperar emisiones de menos de 30 mg/Nm³. Los costes de estas alternativas dependerán del volumen de gas residual. Las circunstancias locales pueden hacer que se alcancen cifras comparables con métodos menos sofisticados. Si se desean mayores reducciones, puede usarse un filtro de mangas seguido de un lavador de lecho relleno, o un lavador Venturi seguido de un lavador de lecho relleno.

4.5.2. Vidrio Plano

En general, las emisiones a la atmósfera de las actividades no relacionadas con la fusión son muy bajas y no requieren medidas de eliminación. Si el baño de flotación funciona correctamente, no hay emisiones apreciables de vapores de estaño. Se utiliza SO₂ al inicio del túnel de recocido pero, nuevamente, si el proceso se utiliza correctamente, las emisiones son insignificantes. Las únicas otras emisiones potenciales son los productos de combustión de los calentadores a gas natural del túnel de recocido. La excepción a esto es cuando se realizan procesos de aplicación de capas en línea. Las emisiones de estos procesos son muy específicas de cada caso, y a continuación se utiliza un ejemplo real para describir las técnicas que pueden emplearse.

Las materias primas de este proceso son: tetracloruro de estaño (SnCl₄), ácido fluorhídrico (HF), metanol (CH₃OH), y silano (SiH₄). Hay dos etapas separadas de aplicación de capas, una capa inferior de silicio metálico y una capa superior de óxido de estaño dopado con flúor. Las emisiones de la aplicación de la primera capa pasan a través de un incinerador térmico para destruir los compuestos orgánicos, el gas residual se enfriá y los sólidos (sílice amorfa) son eliminados por un filtro de mangas. El material recogido se recicla al horno.

En la etapa aplicación de la segunda capa, los gases residuales, que contienen haluros y compuestos de estaño, se pasan a través de un reactor a alta temperatura para oxidar los compuestos de estaño. El óxido de estaño sólido es eliminado por un precipitador electrostático, y los haluros se eliminan en un lavador químico de lecho relleno.

Los niveles de emisión conseguidos son:

Partículas	15 mg/Nm ³
Cloruro de hidrógeno	5 mg/Nm ³
Flúor y sus compuestos gaseosos como HF	<1 mg/Nm ³
Metales	<5 mg/Nm ³

En general, las emisiones de estos tipos de actividades pueden controlarse con una combinación de las técnicas indicadas a continuación; en algunos casos pueden ser apropiadas otras técnicas igualmente eficaces.

- ✓ Equipo de eliminación de polvo, filtro de mangas o PE, aunque un filtro de mangas puede dar emisiones más bajas (1 - 5 mg/Nm³).

- ✓ Las técnicas anteriores pueden combinarse con lavado seco.
- ✓ Lavado químico húmedo.
- ✓ Oxidación a alta temperatura, incineración térmica o similar.

Los costes son específicos de cada centro de producción, pero en general no se consideran desproporcionados a los resultados obtenidos.

4.5.3. Fibra de Vidrio de Filamentos Continuos

Las emisiones a la atmósfera de las actividades no relacionadas con la fusión en este sector proceden de cuatro fuentes principales:

- ✓ Aplicación del recubrimiento a las fibras.
- ✓ Secado del aglomerado.
- ✓ Corte y molturación.
- ✓ Procesos secundarios.

Las emisiones a la atmósfera de la aplicación de recubrimientos son generalmente bastante bajas debido a la baja volatilidad de los materiales de recubrimiento y las bajas temperaturas del vidrio en el punto de aplicación. Un aspecto importante de esto es la selección de materiales de recubrimiento con niveles bajos de disolventes orgánicos. No obstante, habrá presencia de algunas sustancias volátiles, en forma de disolventes o como subproductos de las reacciones. Los materiales de recubrimiento utilizados varían ampliamente entre productos e instalaciones, pero la selección de materiales es el método más eficaz de reducir las emisiones. Los elevados volúmenes de aire necesarios para enfriar el vidrio hacen muy difícil y caro controlar las emisiones de COV mediante medidas secundarias.

Los elevados caudales de aire pueden producir un cierto arrastre de gotas y facilitar la volatilización de los COV presentes. Con frecuencia se utilizan sistemas de lavado húmedo para controlar el gas residual, pero el efecto sobre las sustancias volátiles estará limitado a la condensación. También pueden usarse precipitadores electrostáticos húmedos en esta aplicación, pero no se conocen ejemplos de ello. Los costes del lavado húmedo y de los precipitadores electrostáticos húmedos serán similares a los indicados para el sector de Lana Mineral. Los niveles de emisiones alcanzados dependerán por completo de los niveles iniciales específicos de cada caso; en el Capítulo 3 se indican algunos niveles máximos.

Los aglomerados húmedos se secan normalmente en hornos, y las sustancias volátiles a estas temperaturas se emitirán junto con el vapor de agua. En general, los pesos moleculares de las materias son bastante elevados, y una parte considerable de las sustancias volátiles se habrá emitido durante la aplicación del recubrimiento. Hay poca información disponible sobre los niveles de emisión (Capítulo 3), y actualmente la única técnica empleada para minimizar las emisiones es la selección de materias. Los volúmenes de gases residuales son bastante bajos, y podrían usarse técnicas de control estándar, como incineración, adsorción y lavado, si se observaran emisiones significativas. No hay disponible información de costes para estas técnicas en esta aplicación, pero estas técnicas están fácilmente disponibles para volúmenes de gases bajos. No obstante, siempre será preferible controlar estas emisiones mediante la optimización de la formulación del recubrimiento, antes de instalar cualquier técnica de eliminación.

Las emisiones de polvo derivadas del corte y la molturación pueden tratarse fácilmente mediante su aspiración a un sistema filtro. Esta es la técnica estándar utilizada en este sector, y permite conseguir emisiones del orden de 1 - 5 mg/Nm³.

El proceso secundario puede comportar el uso de otros materiales de recubrimiento o aglomerantes. Las emisiones son muy específicas de cada caso, y pueden utilizarse técnicas de eliminación estándar para COV y trazas de gases si las medidas primarias no consiguen el nivel de eficacia deseado.

4.5.4. Vidrio Doméstico

En la mayoría de procesos de vidrio doméstico no hay emisiones significativas a la atmósfera de las actividades posteriores al horno. Se utilizan una serie de sistemas de quemadores para mantener la temperatura correcta del vidrio, para pulido al fuego y en el túnel de recocido, pero no hay emisiones significativas que requieran controles específicos. La excepción a esto es la producción de artículos que requieren corte y pulido, particularmente el vidrio al plomo, el cristal al plomo y el vidrio de cristal.

El corte comporta tallar formas precisas en los artículos de vidrio en bruto mediante ruedas impregnadas con diamante, tanto manual como automáticamente. También pueden realizarse otras actividades de corte y esmerilado, como el esmerilado de los bordes. El agua se utiliza normalmente como refrigerante para el corte y para evitar emisiones de polvo. También puede haber aspiración para eliminar la neblina de refrigerante. Cuando estas actividades se realizan sumergidas en un refrigerante líquido, no hay emisiones apreciables a la atmósfera, aunque en el sistema de eliminación puede ser necesario un eliminador de neblinas. Si se realizan operaciones de corte o esmerilado en seco, el polvo puede extraerse y pasarse a través de un sistema de filtro eficaz, para dar emisiones de polvo del orden de 1 - 5 mg/Nm³.

El corte de vidrio produce una superficie gris y sin acabar en el vidrio. La superficie del vidrio se devuelve a su aspecto original mediante inmersión en un baño de pulido compuesto por ácido fluorhídrico y sulfúrico. De la superficie del baño se desprenden vapores de vapores de HF y SiF₄. La forma más eficaz de tratar estas emisiones es normalmente el lavado húmedo, con agua o con una solución química. Durante esta operación, se forma ácido hexafluorosilícico (H₂SiF₆) (hasta un 35 %), y la solución de lavado ácido debe ser neutralizada. Como alternativa, puede recuperarse H₂SiF₆ y, si es factible, utilizarlo como materia prima en la industria química.

En estas aplicaciones pueden conseguirse niveles de emisiones muy bajos con lavadores húmedos, <5 mg/Nm³ de HF. Debido a la naturaleza muy ácida de las emisiones, hay una elevada solubilidad en agua, y el lavado químico es improbable que sea necesario. El lavado químico produce un menor consumo de agua, pero impide la recuperación de H₂SiF₆ del efluente. Se están desarrollando técnicas alternativas al pulido con ácido, como el pulido mecánico y el pulido a alta temperatura con llama o láser, pero en el momento presente estas técnicas no pueden considerarse como disponibles.

4.5.5. Vidrio Especial

En general, no hay emisiones significativas a la atmósfera de las actividades de acabado estándar en este sector. La producción de vidrio para TV comporta actividades de esmerilado y pulido, pero éstas se realizan mediante inmersión en un medio líquido y no deben dar origen a emisiones a la atmósfera. Si el vidrio para TV o cualquier otro producto es sometido a corte, esmerilado o pulido en seco, las emisiones pueden controlarse mediante aspiración a un sistema de filtro de mangas para conseguir emisiones de polvo del orden de 1 - 5 mg/Nm³. Se trata de un sector muy diverso y puede haber actividades en algunas instalaciones, que requieren un estudio específico para cada centro de producción.

4.5.6. Lana Mineral

Las emisiones de las actividades no relacionadas con la fusión del Sector de Lana Mineral tienen su origen en cuatro actividades principales: moldeo, polimerización, enfriamiento de los productos, y mecanización y embalaje de los productos. El Capítulo 3 indica que las emisiones del moldeo y de la polimerización son las más significativas. Estas emisiones están relacionadas en gran medida con el uso de un sistema de aglomerante a base de resinas fenólicas.

Las técnicas de esta sección se han descrito por separado para la zona de moldeo y la zona de polimerización, tanto por conveniencia como por la distinta naturaleza de los gases residuales. No obstante, varias de las técnicas son aplicables en ambas áreas y, particularmente en la producción de lana de vidrio, puede ser conveniente combinar las emisiones para su eliminación. En tal caso, las técnicas se describen con más detalle en la sección de la zona de moldeo y se hace referencia a ésta para la polimerización.

Hay varias diferencias importantes entre las emisiones de las líneas de producción de lana de vidrio y de lana de roca, y las mismas se discuten en las secciones relativas a las técnicas a las que son más relevantes.

4.5.6.1. Zona de Moldeo

En la zona de moldeo, la roca o el vidrio fundido se fibra y se aplica el aglomerante. La fibra recubierta de resina se dirige a una correa de recogida sometida a aspiración. En los procesos de lana de vidrio, se pulveriza agua en el conducto de aspiración y en el ventilador. Esto cumple dos funciones, la preventión de acumulaciones de material en el conducto y la eliminación de algunos componentes gaseosos y partículas de la corriente de gas. Los procesos de lana de roca hacen un uso diferente de los pulverizadores de agua en los conductos; algunos son comparables con los que se realizan en las plantas de lana de vidrio, pero muchos no utilizan pulverizadores de agua en absoluto. Las campañas de los cubilotes para lana de roca duran unas semanas, por lo que se tiene ocasión de limpiar el conducto, y los pulverizadores de agua no siempre se consideran necesarios.

El gas residual de la zona de moldeo puede contener niveles significativos de partículas, fenol, formaldehído y amoniaco. Las partículas consisten en material inorgánico y orgánico, a menudo pegajoso y con un tamaño de partícula muy pequeño. También pueden detectarse niveles bajos de COV y aminas si están presentes en la composición del aglomerante. Debido a la naturaleza del proceso, la corriente de gas está ligeramente por encima de la temperatura ambiente, tiene un elevado volumen y (si se utilizan pulverizadores de agua en el conducto) está saturada de agua. Estas propiedades, combinadas con la naturaleza de los contaminantes, limitan el número de técnicas de eliminación que pueden aplicarse.

Las emisiones pueden verse afectadas significativamente por una serie de factores, en particular:

- ✓ La composición química del aglomerante;
- ✓ La técnica de fibrado;
- ✓ Las condiciones operativas (temperatura, caudal de aire y humedad);
- ✓ La cantidad de aglomerante aplicado; y
- ✓ El método de aplicación del aglomerante.

La optimización de estos parámetros, en conjunción con los pulverizadores de agua en los conductos, puede reducir significativamente las emisiones del proceso. La composición química del aglomerante es uno de los factores más importantes y tiene importantes implicaciones para el sistema de agua de proceso, así como para las emisiones de moldeo, polimerización y enfriamiento. Los sistemas de aglomerantes varían de un productor a otro y normalmente no son muy conocidos fuera del sector. Estos sistemas pueden ser muy específicos de cada centro de producción, por lo que deben considerarse individualmente. La sección siguiente resume algunos de los aspectos principales.

Consideraciones sobre la Composición Química de las Resinas y Aglomerantes

La optimización de la composición química del sistema de aglomerante y la eficacia del método de aplicación pueden tener un efecto sustancial sobre las emisiones al medio ambiente. El aglomerante representa asimismo un elevado porcentaje del coste del producto final. Por consiguiente, los productores consideran los avances en la composición de los aglomerantes y en las técnicas de aplicación como altamente confidenciales.

El aglomerante está compuesto de agua, resina fenólica, urea, sulfato amónico, amonio, silano, aceite mineral, aceite de silicona y posiblemente otros ingredientes concretos del proceso individual. La resina es esencialmente un resol fenólico consistente en una mezcla de trimetilolfenol, dimetilolfenol, formaldehído, productos de reacción menores de fenol y formaldehído, y trazas de fenol. La resina es a base de

agua y contiene normalmente un 50% de sólidos. En la reacción se utiliza un exceso de formaldehído para conseguir un bajo nivel de fenol libre.

Algunas resinas son catalizadas por aminas y pueden originar niveles significativos de aminas gaseosas en el gas residual. Estas emisiones pueden eliminarse prácticamente utilizando otras sustancias como catalizadores en la producción de resinas. Pueden usarse una serie de sustancias, pero los detalles precisos de los sistemas optimizados se consideran normalmente como información confidencial. Utilizando sistemas de resina no catalizados con aminas, pueden conseguirse niveles de emisiones inferiores a 5 mg/Nm³. Si una empresa no tiene suficiente experiencia propia para desarrollar una resina no catalizada por aminas, puede conseguir sistemas de este tipo adquiriéndolos a través de proveedores especializados de resinas.

Se hace reaccionar urea con la resina para extender la resina y reducir los niveles de formaldehído libre, y también tiene el efecto de mejorar la resistencia al fuego del producto final. La urea reacciona con formaldehído libre en la resina formando metilolureas, que a su vez reaccionan con los puntos activos en la resina fenólica y toman parte en el mecanismo de unión cruzada (cross-linking) durante la polimerización. La urea actúa como sustituto para el fenol y abarata el aglomerante. Por lo tanto, hay un incentivo para el producto en aumentar al máximo la cantidad de urea en la resina, hasta el punto en que la calidad del producto o los parámetros de proceso se vean afectados negativamente.

La urea tiene dos inconvenientes principales: reduce la solubilidad de la resina, y puede descomponerse tanto en la zona de moldeo y en la zona de polimerización formando amoniaco. Medioambientalmente, la maximización del uso de urea es beneficiosa, puesto que reduce las emisiones de formaldehído, sustituye el fenol, y los productos de descomposición de la urea son preferibles a los derivados fenólicos y los productos de combustión parcial que se emitirían de otro modo.

El amoniaco desempeña un importante papel en el sistema aglomerante y permite un cierto grado de flexibilidad, que es importante a la hora de optimizar el proceso en su conjunto. El amoniaco mejora la solubilidad del aglomerante, permitiendo agregar más urea y permitiendo que el aglomerante pueda almacenarse durante más tiempo. También ayuda a mantener el pH del sistema en el rango correcto y reacciona con el formaldehído libre. La naturaleza del proceso es tal que pueden ocurrir emisiones de amoniaco superiores a las normales durante cortos períodos de tiempo. Los efectos de la reducción de los niveles de amoniaco en el proceso pueden ser desproporcionados en relación con los efectos sobre el resto del proceso, y mayores niveles de emisión de amoniaco pueden producir menores emisiones globales.

El sulfato amónico se agrega para controlar la polimerización de la resina. El silano proporciona una interfase vital entre el vidrio inorgánico y el aglomerante orgánico. Los grupos hidroxílicos del silano interaccionan con los óxidos del vidrio, y el grupo funcional orgánico reacciona con la resina formando una fuerte unión. Los aceites minerales y de silicona se agregan para mejorar las características de manipulación del producto, suprimir la formación de polvo, y proporcionar un grado de repelencia al agua.

Cuando se aplica el aglomerante al vidrio caliente en la zona de moldeo, los compuestos volátiles (como amoniaco, formaldehído y fenol) se vaporizarán y serán extraídos al punto de emisión. El nivel de emisiones volátiles estará en función de la cantidad de material volátil sin reaccionar en el aglomerante, la dilución del aglomerante, la temperatura en la campana de moldeo y la temperatura del vidrio. El aglomerante se aplica en forma de un fino rocío, y las gotas no retenidas en la manta se emitirán en el aire extraído. El grado de retención de aglomerante en el producto dependerá de la distribución del tamaño de las gotas, el espesor de la manta y el nivel de aspiración aplicado.

Se han evaluado varias alternativas a los aglomerantes a base de resinas, pero no se ha encontrado ninguno que dé una calidad de producto aceptable.

4.5.6.1.1. Chorros de impacto y ciclones

Descripción de la técnica

Un factor importante a la hora de considerar sistemas de eliminación apropiados para la zona de moldeo es el contenido de agua del caudal de gas. La naturaleza continua de la producción de lana de vidrio requiere el uso de un mecanismo de limpieza para evitar la acumulación de material orgánico pegajoso y de fibra en el conducto de aspiración y el ventilador. La técnica normal aplicada es el rociado con agua del interior del conducto, que puede tener diversas formas. La naturaleza discontinua de la producción de lana de roca en cubilote (campañas de 1 a 3 semanas) ofrece la oportunidad de limpiar los conductos si es necesario. Asimismo, la producción de lana de roca comporta un uso relativamente menor de aglomerante por unidad de volumen de producto, por lo que la acumulación es más lenta. Algunos procesos de lana de roca utilizan pulverizadores de agua en la zona de moldeo, pero esto es debido en gran parte a preferencias de los productores o a requisitos específicos de los centros de producción.

Si se utilizan pulverizadores de agua para limpiar los conductos, es lógico optimizar su uso para limpiar asimismo el gas residual. En esta situación, los dos objetivos son totalmente complementarios, cuanta más materia se extrae del gas residual, más eficaz es la función de limpieza. Los sistemas han sido generalmente adaptados más allá del mínimo necesario para evitar acumulaciones indeseadas en los conductos. Dentro del sector se utiliza el término chorros de impacto para describir esta técnica optimizada.

Con el fin de optimizar la eficacia de la limpieza de los gases, los sistemas pueden aplicar el agua en gran volumen y a alta presión, pero esto no produce una caída de presión significativa. El diseño de los chorros de impacto varía de un proceso a otro, aunque su propósito es optimizar la eficacia de la técnica, tanto para la limpieza de conductos como para el lavado de gases residuales. Para eliminar el agua en suspensión del gas residual, los chorros de impacto se combinan siempre con ciclones (u otros dispositivos), que también tienen efecto sobre los niveles de partículas según el diseño, como se describe en la Sección 4.4.1.4.

La eliminación de partículas y de gotas se produce mediante impacto o golpeo, y en menor medida por difusión. Algunos sistemas pueden tener un estrechamiento del conducto para mejorar la eficacia de eliminación, pero la eficacia de eliminación de partículas depende predominantemente de la caída de presión, que es baja para todos estos sistemas.

Puede haber una absorción parcial de sustancias gaseosas por contacto con el agua. La eficacia de la absorción de gas depende de: la diferencia entre la presión parcial del gas en el gas residual y la presión de vapor del gas en el líquido; la solubilidad del gas en el líquido; la superficie de contacto; y, en menor medida, el tiempo de contacto. Habrá un efecto de condensación, que puede ser importante si el gas residual está caliente.

Normalmente, para los chorros de impacto se utiliza agua de proceso, que ya contiene la mayoría de sustancias presentes en la corriente de gas en distintas cantidades. Esto afecta particularmente la eficacia de la eliminación de sustancias gaseosas. El agua de proceso reciclada se filtra antes de volver a aplicarse, pero contiene niveles considerables de materias solubles. El sistema es un equilibrio dinámico, y el sistema de agua de proceso se describe más adelante en este documento.

Eficacia medioambiental

Debido a la baja caída de presión, la eficacia de eliminación de partículas finas y gotas es bastante baja. No obstante, en la zona de moldeo, una cantidad significativa del material sólido es bastante grande y fibrosa, y es fácilmente eliminada por los chorros de impacto y ciclones. Las emisiones finales dependen mucho de la composición del aglomerante y del agua de proceso, así como de la cantidad de aglomerante aplicado. Las cifras que se alcanzan mediante esta técnica se indican en la Tabla 4.29.

Consideraciones económicas

Los costes de esta técnica se indican en la Tabla 4.30 y dependen en gran medida del caudal de aire y del tamaño de la planta. Los costes de la técnica como medida de eliminación son difíciles de evaluar, dado que, cuando se utilizan chorros de impacto, un requisito inherente del proceso es algún tipo de mecanismo de limpieza. Los costes indicados en la tabla representan el coste total del sistema. No hay ejemplos de sistemas que se apliquen sólo para la limpieza del conducto, sino que siempre se instalan con un doble propósito. Se estima que el elemento de limpieza de gas representa un 60% del coste total. No obstante, este análisis es un poco académico, puesto que en la mayoría de Estados Miembros no se permitirían emisiones sin ningún tipo de eliminación y habría otros costes de eliminación.

Aplicabilidad

En principio, esta técnica es aplicable a todos los procesos de lana de vidrio y lana de roca. No se utiliza en muchas plantas de lana de roca dado que no se considera necesario para la limpieza del proceso, y puede afectar negativamente otras técnicas de eliminación empleadas. Para las emisiones de la zona de moldeo, los chorros de impacto y ciclones se utilizan en aproximadamente un 90% de las plantas de lana de vidrio y en un 10% de las plantas de lana de roca.

Consideraciones asociadas

A menos que se utilice otra técnica como un lavador de lecho relleno, los ciclones (o en ocasiones un dispositivo auxiliar) llevan incorporados chorros de impacto para eliminar el agua en suspensión. Esto es necesario para reducir el consumo de agua, y para conseguir niveles aceptables de visibilidad y dispersión de la nube de humo. Cuando se utilizan otras técnicas (Ej. PE húmedos o lavadores de lecho relleno), los chorros de impacto se utilizan generalmente antes.

Instalaciones de Ejemplo.

Esta técnica se aplica tan ampliamente que no es necesario especificar instalaciones de ejemplo

4.5.6.1.2. Lavadores húmedos

Descripción de la técnica

Los sistemas de lavado húmedo pueden utilizarse para controlar las emisiones gaseosas y de partículas. Aunque la tecnología básica de ambos es similar, los criterios de diseño para la eliminación de partículas o gas son muy distintos. No obstante, para mantener bajos los costes de inversión, con frecuencia se utilizan sistemas de lavado húmedo para controlar las emisiones mixtas de partículas y gases. El diseño es inevitablemente un compromiso, pero puede representar MTD cuando los sistemas de control separados puedan ser prohibitivamente caros. El lavado húmedo es una técnica bien documentada, por lo que aquí sólo se discuten los principios y aspectos básicos específicos de este sector.

La recogida de partículas mediante lavado con líquido se produce mediante tres mecanismos: impacto por inercia, intercepción y difusión. La eliminación de las trazas de gases mediante lavado húmedo se produce por absorción y, en menor medida, por condensación. La absorción comporta la transferencia de materia entre un gas soluble y un disolvente en un dispositivo de contacto gas-líquido.

La eficacia de recogida de partículas de los lavadores húmedos depende fuertemente del consumo total de energía, particularmente de la caída de presión a lo largo de la zona de recogida. Si el líquido está uniformemente dispersado en el lavador, caídas de presión similares producirán normalmente eficacias similares de eliminación del mismo polvo para diseños de lavador bastante distintos. Así, no es posible diseñar un lavador húmedo que tenga elevadas eficacias en partículas de $1 \mu\text{m}$ o menos, y que no tenga una elevada caída de presión. Los lavadores de alta energía pueden dar buenas eficacias de recogida para partículas $<0.5 \mu\text{m}$, pero el elevado coste de funcionamiento comporta que haya técnicas alternativas que pueden ser más económicas.

La eficacia de la absorción de gas depende de: la diferencia entre la presión parcial del gas soluble en la corriente de gas residual y la presión de vapor del gas en el líquido; la solubilidad del gas en el líquido; la superficie de contacto; y, en menor medida, el tiempo de contacto. Habrá asimismo un efecto de condensación, que puede ser importante si el gas residual está caliente. La solubilidad depende obviamente del gas y del líquido. El agua es adecuada para absorber gases ácidos solubles como cloruro de hidrógeno, fluoruro de hidrógeno, hexafluoruro de silicio, y para amoniaco. Las soluciones alcalinas o ácidas son adecuadas para absorber gases menos solubles, y en algunas aplicaciones las soluciones oxidantes pueden controlar los olores orgánicos. La superficie viene determinada por el material de relleno o el tamaño de gota.

Los lavadores de lecho relleno consisten en un cuerpo exterior que contiene un lecho de material de relleno sobre rejillas de soporte distribuidores de líquido, entradas y salidas de gas y líquido, y un eliminador de neblinas. El líquido se distribuye continuamente sobre el material de relleno formando una película, que proporciona una superficie grande para el contacto gas/líquido. La corriente de gas sucio fluye a través del lecho relleno, y los flujos de líquido y gas pueden ser a contracorriente, concurrentes o transversales. Hay varios tipos de material de relleno, que pueden disponerse de forma aleatoria u ordenada. La película de material sobre el material de relleno proporciona una superficie grande para la transferencia de materia. Los absorbentes de lecho relleno a contracorriente potencian al máximo la fuerza de impulsión para absorción, dado que el gas que sale del lecho relleno se encuentra con líquido absorbente fresco. Los lechos llenos pueden bloquearse por partículas insolubles, escamas y crecimientos biológicos.

En algunas aplicaciones puede considerarse el uso de lavadores de Venturi. Su característica peculiar es la constricción del conducto (cuello de Venturi) que produce un aumento de la velocidad del gas. Se introduce líquido en el lavador, formando una película en las paredes, que es atomizada por la corriente de gas en el cuello de Venturi. La eficacia del lavador de Venturi depende de la caída de presión, y en consecuencia su consumo de energía y costes operativos son mayores. Los lavadores de Venturi son generalmente los dispositivos de lavado húmedo más eficaces para la recogida de partículas, ya que son adecuados para partículas de menos de una micra. También pueden usarse para la eliminación de trazas de gases, pero su eficacia se ve limitada por el bajo tiempo de contacto.

Los lavadores húmedos más empleados en el sector son los lavadores de lecho relleno, normalmente con chorros de impacto antes. Los chorros de impacto eliminan las partículas grandes y por lo tanto contribuyen a evitar el bloqueo del relleno. Algunos productores han instalado lavadores húmedos ionizantes (LHI), que pretenden combinar las ventajas de bajo coste de inversión de los lavadores húmedos con los bajos costes operativos de los precipitadores electrostáticos. Un LHI es básicamente un lavador de lecho relleno mantenido en un estado de carga neutro y precedido de una sección ionizante para cargar las partículas. El lecho está normalmente compuesto de un relleno plástico. Las velocidades del gas a través del lecho son lo suficientemente bajas para asegurar que las partículas pasen el máximo de tiempo posible cerca de los elementos del relleno.

Cuando el gas residual de la zona de moldeo entra en contacto con agua en un sistema de lavado eficaz, ocurre lo siguiente:

- ✓ Una parte de las partículas en suspensión, predominantemente las partículas y gotas más grandes, se mantiene en suspensión;
- ✓ Una parte del material resinoso soluble será absorbida por el agua; y
- ✓ Las sustancias volátiles formarán un equilibrio entre las fases gaseosa y acuosa.

El agua de proceso es la solución de lavado más comúnmente usada en el sector. Presenta el posible problema de mantener concentraciones suficientemente bajas de compuestos volátiles en el medio de lavado para facilitar una absorción eficaz, y para evitar la reemisión de la fase gaseosa. El proceso de fabricación de lana mineral es un consumidor neto de agua, y la eficacia del lavador puede mejorarse introduciendo

ciendo agua limpia de la parte superior en el sistema lavador. Esta mejora puede optimizarse utilizando un proceso combinado de lavado en multietapas, con un flujo de agua de una etapa a la siguiente en contracorriente a la corriente de gas. De este modo, el agua más sucia se utiliza para lavar la corriente de gas entrante (más sucia) y el agua más limpia se emplea en la última etapa de lavado.

Una posible solución al problema sería separar el medio de lavado del sistema de agua de proceso y utilizar agua limpia con una purga suficientemente grande para mantener una absorción eficaz, o dosificar químicamente la solución de lavado con sustancias que reaccionen con los compuestos volátiles. No obstante, ambos enfoques presentan importantes limitaciones. Para conseguir una eficacia sustancialmente mejor utilizando un sistema de agua limpia, el volumen de la purga sería demasiado grande para reciclar al sistema de agua de proceso, y daría lugar a una nueva corriente residual que requeriría tratamiento separado. El volumen de agua procedente de los chorros de impacto agravaría el problema.

El contenido de agua y la naturaleza resinosa del gas residual causarían bloqueos y problemas de volumen de la solución de lavado en un lavador químico a menos que se aplicara una purga de gran volumen. Debido al contenido químico, ninguna de ellas podría reciclarse al sistema de agua de proceso, dando lugar a una nueva corriente residual que requeriría tratamiento separado. Una complicación ulterior es que los reactivos químicos necesarios para eliminar fenol / formaldehído y amoniaco son incompatibles y requerirían etapas separadas. Las etapas de lavado químico podrían situarse en serie con un lavador de agua de proceso, pero esto aumentaría en gran medida los costes, y a menos que fuera extremadamente eficaz no superaría los problemas indicados. Asimismo, cuando se considera la corriente residual acuosa, la diferencia en las emisiones globales entre esta técnica y un lavador de agua de proceso con buen control de proceso puede ser bastante pequeña.

El lavado multietapas en una unidad combinada o en unidades separadas es en teoría una posible opción para la zona de moldeo y para las emisiones combinadas de moldeo y del horno de polimerización. No obstante, no hay procesos de lana mineral que utilicen lavadores multietapas, por lo que no hay información disponible sobre su eficacia medioambiental. No obstante, podría considerarse como una opción si las emisiones en línea son muy elevadas en una determinada instalación

Eficacia medioambiental

Los niveles de emisiones obtenibles con lavadores de lecho lleno (con agua de proceso como solución de lavado) en la industria de lana mineral se indican en la Tabla 4.29. La eficacia está limitada para partículas por la baja caída de presión, y para sustancias gaseosas por el uso de agua de proceso como medio de lavado. Cabe esperar niveles de emisiones significativamente menores para fenol, formaldehído y amoniaco con lavado con agua limpia. El equilibrio del agua de proceso es un factor crítico, y es posible que en algunos casos raros (como un producto con bajo nivel de aglomerante tras un periodo sostenido de producto con alto nivel de aglomerante) la eficacia del lavador pudiera ser negativa para componentes gaseosos.

Varios productores han utilizado lavadores húmedos ionizantes en años recientes, pero los resultados globales han sido desalentadores. Las mejoras en la eficacia con respecto a lavadores de lecho lleno han sido generalmente menores del 10%. No hay experiencia de lavado químico o multietapas en este sector, pero la experiencia en la industria química sugiere que podrían conseguirse fácilmente emisiones por debajo de 10 mg/Nm³ para fenol, formaldehído y amoniaco, si pudieran superarse los problemas asociados. En comparación con las cifras indicadas en la Tabla 4.29, esto sólo representa una pequeña mejora para amoniaco.

Consideraciones económicas

Los costes de esta técnica se indican en la Tabla 4.30 y dependen en gran medida del caudal de aire y del tamaño de la planta. La incorporación de una etapa de ionización como en los LHI supone una aumento en los costes de inversión de aproximadamente un 75%, y un aumento aproximado del 10% en los costes operativos. Cabe esperar que el lavado químico multietapas tenga un coste hasta el doble de las

cifras indicadas en la tabla. El coste de un lavador multietapas combinado sería probablemente más comparable. No obstante, sería necesario separar por completo las etapas, lo que aumentaría el coste, siendo necesarios materiales resistentes a la corrosión de mayor coste.

Aplicabilidad

En principio, los lavadores de lecho relleno con circulación de agua de proceso son aplicables a todos los procesos del sector. La técnica no está limitada a plantas nuevas o modificaciones sustanciales, pero es probable que los costes sean mayores para instalaciones existentes. En algunas aplicaciones, particularmente lana de vidrio, pueden usarse otras técnicas para conseguir niveles de emisiones similares o inferiores.

En la producción de lana de vidrio, algo menos del 20% de las instalaciones utilizan lavadores de lecho relleno, bien para las emisiones combinadas de la zona de moldeo y del horno de polimerización, bien sólo para la zona de moldeo. En la producción de lana de roca, los lavadores de lecho relleno se utilizan en aproximadamente un 10% de las instalaciones para las emisiones de la zona de moldeo, y los mismos para la zona de polimerización. Las emisiones de las dos zonas no se suelen combinar en las instalaciones de producción de lana de roca.

Consideraciones asociadas

Una consideración importante para los lavadores húmedos es el posible efecto sobre otros medios de crear una corriente residual acuosa que requiera tratamiento. En el Sector de Lana Mineral este problema se ha evitado utilizando agua de proceso como medio de lavado, con un reciclaje del 100% al sistema de agua de proceso. El uso de lavadores de agua limpia o químicos produciría una corriente residual acuosa.

Una ventaja de esta técnica es la oportunidad de combinar las emisiones de la zona de moldeo y del horno de polimerización en una sola etapa de tratamiento. El volumen del gas residual de la zona de moldeo es generalmente diez veces mayor que el del horno de polimerización. Si se proyecta en la fase de diseño, la combinación de los gases residuales no supone un aumento sustancial del coste global de la técnica.

Instalaciones de ejemplo

Owens Corning Building Products (Reino Unido) Ltd, St Helens, Reino Unido.

Pfleiderer Delitzsch, Alemania

Isover Orange, Francia

4.5.6.1.3. Precipitadores electrostáticos húmedos

Descripción de la técnica

Los principios básicos y el funcionamiento de los PE se describen en la Sección 4.4.1.2. En los precipitadores húmedos, el material recogido se elimina de las placas colectoras mediante un líquido adecuado, normalmente agua, de forma intermitente o mediante irrigación por rociado continuo. Los tres tipos principales, placa e hilo, placa y placa, y tubo e hilo, pueden utilizarse en húmedo. En los tipos de placa, el flujo de gas es horizontal, mientras que en los diseños tubulares el flujo de gas es vertical y el flujo de líquido es a contracorriente del gas. En algunos diseños más robustos, los hilos son sustituidos por barras. Normalmente hay algún mecanismo previsto para eliminar las gotas de agua antes de su evacuación, que puede ser un eliminador de neblinas, o en ocasiones el último campo puede funcionar en seco.

Aunque en general es preferible la precipitación SECAM, los precipitadores húmedos son útiles para eliminar el polvo de los gases húmedos con temperaturas cercanas al punto de rocío y para recoger aerosoles líquidos y materiales pegajosos como partículas resinosas y alquitranes. La eficacia de los precipitadores húmedos depende menos de las propiedades de las partículas, dado que la humedad presente en el gas precipita rápidamente y facilita la precipitación del polvo difícil.

Las unidades tubulares se utilizan más comúnmente en aplicaciones húmedas, y es más fácil hacer que sean resistentes a explosiones si hay alquitranes presentes. No obstante, las unidades tubulares generalmente tienen un solo campo eléctrico y son menos adecuadas para conseguir eficacias muy elevadas. Los tres tipos han sido utilizados en la fabricación de lana mineral, pero actualmente se prefieren los tipos de placa e hilo y de tubo e hilo. Normalmente se instala un sistema de inundación para apagar los incendios.

A la entrada del PEH, los gases de escape deben estar bien distribuidos para producir una velocidad de gas baja y uniforme entre todos los elementos. El gas residual es acondicionado por los chorros de impacto antes del PE, que eliminan el material fibroso grande y saturan y enfrián el gas. Para asegurar un funcionamiento dentro de los parámetros de diseño, también se utiliza agua limpia, que se pulveriza a la entrada del PE para asegurar la saturación del gas y se utiliza para limpiar los electrodos. En los procesos de lana de vidrio, el volumen de esta agua es generalmente lo bastante bajo para ser evacuado al circuito de agua de proceso, y puede representar el principal relleno del circuito. En la mayoría de procesos de lana de roca, el potencial de evaporación del proceso de moldeo es mucho menor y no es posible utilizar un volumen tan grande de agua limpia.

Eficacia medioambiental

Los PE son eficaces para eliminar las partículas, aerosoles y gotas de tamaños comprendidas entre $10\mu\text{m}$ y $0,01\mu\text{m}$. La eficacia dependerá de una serie de factores, en particular la velocidad del gas. Un PE nuevo diseñado a propósito podría conseguir una eficacia de eliminación >98 % para el total de partículas $>1\mu\text{m}$, aunque la eficacia de eliminación baja rápidamente para partículas $<1\mu\text{m}$. La eficacia puede decaer con la vida del equipo, y el mantenimiento es muy importante.

En general, los PE húmedos muestran una eficacia limitada en la eliminación de sustancias gaseosas. Depende mucho de la gama de productos, así como de la composición del aglomerante y del agua de proceso. No obstante, debido al elevado grado de saturación y al uso de una cantidad sustancial de agua limpia, se produce una cierta absorción de sustancias gaseosas.

Las cifras que pueden alcanzarse mediante esta técnica se indican en la Tabla 4.29.

Consideraciones económicas

Los costes de esta técnica se indican en la Tabla 4.30 y dependen en gran medida del caudal de aire y del tamaño de la planta.

Aplicabilidad

En principio, la técnica es aplicable a procesos de lana de vidrio y de lana de roca tanto nuevos como existentes. La principal desventaja para la lana de roca es la dificultad potencial de desechar la corriente efluente acuosa. La técnica es adecuada para las emisiones en la zona de moldeo o del horno de polimerización, así como para emisiones combinadas de ambas. En 1997, aproximadamente un 30% de las instalaciones de lana de vidrio utilizaban esta técnica para emisiones separadas o combinadas de la zona de moldeo y del horno de polimerización. Ninguna planta de lana de roca utilizaba PE húmedos.

Consideraciones asociadas

<p><u>Ventajas:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Buenas eficacias de eliminación para partículas y para gotas / aerosoles, pueden alcanzarse <20 mg/Nm³. • Posibilidad de absorción de sustancias gaseosas con una elevada saturación y uso de agua limpia. • Aplicable a las emisiones de moldeo y polimerización. • Baja caída de presión, con lo que los costes operativos y el consumo energético son relativamente bajos. • Los bloqueos son raros si se utilizan chorros de impacto para eliminar la materia fibrosa grande. • Larga vida útil con un bajo mantenimiento. <p><u>Desventajas:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Se genera un efluente acuoso, que generalmente es reciclable en la producción de lana de vidrio, aunque bastante menos en la producción de lana de roca. • Se consume energía, aunque relativamente poca en comparación con otros requisitos de proceso. • Costes de inversión relativamente elevados. • Requisitos de espacio considerables. • El mantenimiento es bajo aunque crítico; un mal mantenimiento causa una caída considerable de la eficacia. • El elevado voltaje impone requisitos de seguridad.

Tabla 4.26: Principales ventajas y desventajas de los PE húmedos

Instalaciones de ejemplo

Owens Corning Building Products (Reino Unido) Ltd, St Helens, Reino Unido.

G + H, Speyer, Alemania

Isover Etten-Leur, Holanda

4.5.6.1.4. Filtros de lana de roca

Descripción de la técnica

Los procesos de filtración pasiva convencionales (como filtros de mangas) no son adecuados para tratar los gases residuales de las operaciones de la zona de moldeo y del horno de polimerización. La naturaleza adhesiva y en ocasiones húmeda del gas produciría una rápida obstrucción, incluso con limpieza y mantenimiento intensivos. En las actividades de lana de roca, en las que los procesos de moldeo son frecuentemente secos, pueden emplearse filtros de planchas de lana de roca. Estos consisten en una estructura de acero o cemento en la que planchas de lana de roca montadas en cajas actúan como medio de filtración. Este tipo de filtro tiene una buena eficacia de eliminación de partículas y gotas de aglomerante, pero tiene una mala eficacia para la eliminación de compuestos gaseosos. El medio del filtro debe cambiarse periódicamente para mantener la eficacia de eliminación de partículas y evitar una mayor resistencia a la circulación de aire. Las planchas de filtro usadas pueden reciclarse normalmente al horno si se dispone de un proceso de briquetado.

La operación puede ser de tipo semiseco, pero la eficacia global mejora mucho si la operación es seca. Ninguno de los sistemas genera una corriente residual acuosa, y las planchas de filtro húmedas pueden también reciclarse fácilmente mediante un proceso de briquetado.

Una versión antigua de este diseño estaba basada en un filtro de columna con rollos de lana de roca como medio de filtro. Esta técnica es menos eficaz y ha sido sustituida en gran parte por el diseño de planchas montadas en cajas. El diseño de filtro de columna era más adecuado para gases residuales más húmedos y mayor contenido de aglomerante, pero no podía tratar gases residuales tratados con chorros de impacto.

Eficacia medioambiental

Los filtros de lana de roca tienen gran eficacia para eliminar partículas y gotas/aerosoles. Las cifras de emisiones que pueden alcanzarse con esta técnica se indican en la Tabla 4.29. La técnica no tiene un efecto significativo sobre las sustancias gaseosas pero, en combinación con controles primarios (como operación en seco) y una baja emisión de aerosoles, se alcanzan los niveles que se muestran en la tabla. Esto también produce una visibilidad muy baja de la nube de humo de este tipo de filtro.

Consideraciones económicas

Los costes de esta técnica se indican en la Tabla 4.30 y dependen en gran medida del caudal de aire y del tamaño de la planta. Los costes de inversión son particularmente bajos, y la baja caída de presión produce bajos costes operativos en comparación con otros sistemas de filtro convencionales.

Aplicabilidad

Esta técnica ha estado limitada principalmente a las zonas de moldeo de proceso de lana de roca, aunque hay también algunas aplicaciones en los hornos de polimerización de lana de roca. La técnica es aplicable a procesos de lana de roca tanto nuevos como existentes. El 90% de los procesos de lana de roca utilizan esta técnica para tratar los gases residuales de la zona de moldeo, y menos de un 10% la utilizan para las emisiones de los hornos de polimerización. El uso limitado para hornos de polimerización de lana de roca es debido en parte a la elevada temperatura del gas y también debido al amplio uso de la incineración.

No hay aplicaciones conocidas de la técnica en procesos de lana de vidrio. Los principales motivos de que la técnica no se utilice en procesos de lana de vidrio se discuten a continuación.

La naturaleza continua de la producción de lana de vidrio requiere el uso de un mecanismo de limpieza continuo para evitar la acumulación de material en el conducto de aspiración y el ventilador. La técnica normal aplicada es la de chorros de impacto. Estos no se emplean generalmente en la producción de lana de roca, dado que la naturaleza discontinua del proceso ofrece la oportunidad de limpiar el conducto. Asimismo, la producción de lana de roca comporta un uso relativamente menor de aglomerante, por lo que la acumulación de material es menor.

En el proceso de lana de roca, la fibra se recoge normalmente como una manta de espesor constante, que luego deposita en un transportador de moldeo separado, para dar las propiedades requeridas al producto. La manta primaria es delgada, impone sólo una caída de presión pequeña y constante, y permite el uso e un solo sistema de aspiración de volumen relativamente bajo. En la fabricación de lana de vidrio se utiliza un sistema de moldeo de un solo transportador. El espesor de la manta aumenta a lo largo del transportador de moldeo y varía según el producto. La variación en el diferencial de presión a lo largo del transportador requiere el uso de varios sistemas de aspiración de distinta capacidad, y la aspiración general de aire debe ser de una presión razonablemente alta, variable y controlable. El nivel y la distribución de la aspiración es una importante herramienta de control de proceso, que es variada frecuentemente por los productores. Las condiciones variables de alto volumen y alta presión del gas residual de la lana de vidrio no son ideales para los sistemas de filtración.

El agua saturada con un elevado contenido de aglomerante del gas residual de la zona de formado de lana de vidrio haría que el filtro de lana de roca se bloqueara rápidamente. Esto requeriría frecuentes cambios del medio de filtración y daría lugar a un alto nivel de residuo húmedo que requeriría reciclaje o desecho.

Una ulterior complicación del uso de filtros de lana mineral en procesos de lana de vidrio es la mayor dificultad de reciclar el material al horno. El reciclaje de residuos fibrosos en hornos de lana mineral se discute en la Sección 4.7.

Consideraciones asociadas

<p><u>Ventajas:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Pueden conseguirse buenas eficacias de eliminación para partículas de <20 mg/Nm³. • Las planchas de filtro usadas pueden reciclarse en el proceso, si hay instalaciones disponibles. • No se generan residuos acuosos. • Bajos costes de inversión. • Baja caída de presión, por lo que los costes operativos y el consumo energético son relativamente bajos. <p><u>Desventajas:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Se consume energía, aunque relativamente poca en comparación con otras técnicas secundarias. • Eficacia de eliminación limitada para sustancias gaseosas. • No se considera aplicable para procesos de lana de vidrio.
--

Tabla 4.27: Principales ventajas y desventajas de los filtros de lana de roca

Instalaciones de ejemplo

Rockwool Lapinus, Roermond, Holanda.

Partek Rockwool, Hallekis, Suecia

4.5.6.2. Horno de Polimerización

El producto húmedo entra en el horno, que está a unos 250 °C. La humedad es expulsada junto con cualquier sustancia volátil, y el aglomerante comienza a curarse. La temperatura y el tiempo de estancia en el horno son críticos. El aglomerante debe fijarse adecuadamente pero no sobrecurarse, o la calidad del producto se resentirá. Las emisiones del horno consisten en sustancias volátiles y productos de descomposición del aglomerante, así como productos de combustión de los quemadores del horno. En general, los productos de lana de vidrio contienen niveles de aglomerante relativamente mayores que los productos de lana de roca, por lo que producen mayores emisiones. Las emisiones de los hornos tienden asimismo a producir olores si no se tratan.

El horno es normalmente con combustión a gas y tiene aspiración. Las emisiones del horno son pegajosas y representan un posible riesgo de incendio debido a la deposición de materias del combustible en el sistema de aspiración, particularmente en hornos de lana de vidrio. Para evitar incendios, la corriente de gas debe lavarse con agua o aplicar calor adicional para destruir la naturaleza pegajosa de los contaminantes. En estos procesos sin incineración se suele pulverizar agua en el conducto de aspiración para evitar la acumulación de material resinoso y para evitar incendios. Los pulverizadores de agua eliminarán asimismo algo del material en suspensión en la corriente de gas.

4.5.6.2.1. Chorros de impacto y ciclones

Descripción de la técnica

La técnica se describe en la Sección 4.5.6.1.1 anterior, pero hay otros varios aspectos que deben considerarse. El gas residual del horno tiene mucho menor volumen y mayor temperatura que el gas residual de la zona de moldeo. Por consiguiente, particularmente en procesos de lana de vidrio, la acumulación de material resinoso en el conducto representa un riesgo de incendio e incluso de explosión. El agua pulverizada en el gas tiene un considerable efecto refrigerante, y produce la condensación de algunas sustancias del gas residual. Esto no significa necesariamente que las sustancias sean eliminadas, y en las primeras partes del sistema se volatiliza material del agua de proceso sucia.

Eficacia medioambiental

Debido a la baja caída de presión, la eficacia de eliminación de partículas finas es bastante baja. Al

igual que en la zona de moldeo, el sistema es un equilibrio dinámico y las emisiones gaseosas dependen fuertemente de las composiciones químicas del agua de proceso y del aglomerante. Las cifras que se alcanzan mediante esta técnica se indican en la Tabla 4.29.

Consideraciones económicas

Los costes de esta técnica se indican en la Tabla 4.30 y dependen en gran medida del caudal de aire y del tamaño de la planta. Los aspectos relativos a qué porcentaje del coste puede considerarse como coste de eliminación son los mismos que para la zona de moldeo.

Aplicabilidad

Al igual que para la zona de moldeo, en principio esta técnica es aplicable a todos los procesos de lana mineral. No se utiliza en muchas plantas de lana de roca puesto que no se considera necesario para la limpieza del proceso, y podría afectar negativamente la eficacia de otras técnicas. Para las emisiones del horno de polimerización, se utilizan chorros y ciclones en aproximadamente el 90% de las plantas de lana de vidrio (con frecuencia con emisiones combinadas de la zona de moldeo y del horno), y en alrededor del 10% de las plantas de lana de roca, independientemente o en combinación con otras técnicas húmedas.

4.5.6.2.2. Lavadores húmedos

La técnica se describe para la zona de moldeo en la Sección 4.5.6.1.2, y la discusión es igualmente aplicable a las emisiones del horno. Las principales consideraciones para las emisiones del horno de polimerización son que el volumen es mucho menor y las concentraciones de los contaminantes son distintas; en general, en contenido de partículas es menor, el de fenol es comparable y los contenidos de amonio y formaldehído son significativamente mayores.

Los niveles de emisiones alcanzables con lavadores de lecho lleno (con agua de proceso como solución de lavado) en la industria de la lana mineral se indican en la Tabla 4.29, ver Sección 4.5.6.1.2 para su discusión. Las emisiones de los hornos son relativamente mayores en emisiones gaseosas en comparación con las emisiones de la zona de moldeo, por lo que la eficacia general puede ser mayor. Nuevamente, esto dependerá de la cantidad de agua limpia utilizada y de la composición química del aglomerante y del agua de proceso.

Los costes de esta técnica se indican en el Tabla 4.30 y dependen en gran medida del caudal de aire y del tamaño de la planta. Los costes indicados son para emisiones combinadas de moldeo y polimerización. La mayoría de ejemplos de emisiones del horno de polimerización tratadas mediante lavadores húmedos son para emisiones combinadas, y debido al bajo volumen, el coste adicional es normalmente bajo. La variación en el coste indicado depende en gran medida del caudal de aire, y puede hacerse una estimación general del tratamiento sólo de las emisiones del horno reduciendo proporcionalmente el coste, aunque la relación de coste no es lineal.

En principio la técnica es aplicable a todas las plantas, ver discusión en Sección 4.5.6.1.2.

4.5.6.2.3. Precipitadores electrostáticos húmedos

La técnica se discute para la zona de moldeo en la Sección 4.5.6.1.3, y la discusión es igualmente aplicable a las emisiones del horno. El uso de PE húmedos para tratar sólo las emisiones del horno no es común, y normalmente los sistemas son para emisiones combinadas. Debido a las elevadas concentraciones relativas de sustancias gaseosas y olorosas en el gas residual del horno, el PE no será la primera elección de técnica de eliminación sólo para las emisiones del horno. No obstante, en combinación con las emisiones de la zona de moldeo y con la dilución inherente que comporta, un PE húmedo puede ser una opción lógica.

Los niveles de emisiones alcanzados con esta técnica se indican en la Tabla 4.29, y los costes en la

Tabla 4.30. En principio, la técnica es aplicable a instalaciones tanto nuevas como existentes.

4.5.6.2.4. Incineración de gases residuales

Descripción de la técnica

La incineración se utiliza ampliamente para controlar las emisiones orgánicas de los procesos industriales. Tiene las desventajas de destruir el material (impidiendo su recuperación), a menudo requiere la adición de energía, y produce dióxido de carbono y óxidos de nitrógeno. Sin embargo, puede diseñarse para ser eficaz desde el punto de vista energético, y puede formar parte del suministro de calor a las operaciones de secado o polimerización. Los incineradores pueden ser de dos tipos: incineradores térmicos ($>750^{\circ}\text{C}$) o catalíticos ($350 - 400^{\circ}\text{C}$).

La incineración térmica destruye los compuestos orgánicos mediante oxidación térmica, dando dióxido de carbono, agua, óxidos de azufre y de nitrógeno, y otros productos de combustión. Los principales requisitos para una combustión eficaz son:

- El tiempo de estancia en la cámara de combustión debe ser suficientemente largo para asegurar una combustión incompleta. Una eficacia de destrucción del 99% requerirá un tiempo de estancia de 1 a 4 segundos a la temperatura correspondiente.
- La temperatura operativa debe estar $200 - 400^{\circ}\text{C}$ por encima de la temperatura de inflamación espontánea de la sustancia más estable, las temperaturas operativas típicas están alrededor de 800°C . Si la corriente de gas contiene sustancias cloradas y aromáticas, las temperaturas deben aumentarse hasta $1100-1200^{\circ}\text{C}$, y se requiere un enfriamiento rápido de los gases de combustión para evitar la formación de dioxinas.
- Es necesario que haya turbulencia para conseguir una eficaz transferencia de calor y de materia en la zona de combustión, y para evitar los “puntos fríos”. Esto se consigue normalmente utilizando quemadores que generen una llama de combustión en remolino, e incorporando pantallas en la cámara de combustión.

Es improbable que la incineración catalítica sea una opción practicable en este sector, debido a que la elevada carga de partículas y la presencia de materiales resinosos produciría el envenenamiento del catalizador.

Eficacia medioambiental

La incineración es una técnica extremadamente eficaz para eliminar sustancias orgánicas de corrientes de gases residuales, pero no reduce las partículas inorgánicas. La oxidación de materias orgánicas origina emisiones de CO_2 y NO_x , que en las cantidades emitidas se consideran preferibles a las sustancias destruidas. El gas residual de los hornos de polimerización contiene asimismo amoniaco y otras sustancias que contienen nitrógeno, que se oxidan total o parcialmente produciendo NO_x . Un incinerador bien diseñado reducirá los compuestos orgánicos totales a menos de 10 mg/Nm^3 . Las cifras de emisiones que pueden conseguirse con estas técnicas se indican en la Tabla 4.29.

Consideraciones económicas

Los costes de esta técnica se indican en la Tabla 4.30 y dependen en gran medida del caudal de aire y del tamaño de la planta. La economía de la incineración depende mucho de las posibilidades de recuperación de calor. Los costes dependen de una serie de factores, en particular de los siguientes:

- ✓ El volumen de gas residual a tratar, que determina las dimensiones de la cámara de combustión;
- ✓ La temperatura del gas residual, que afecta el diseño del equipo de combustión y los requisitos de combustible auxiliar;

- ✓ El valor calorífico del gas, que afecta los requisitos de combustible auxiliar;
- ✓ La temperatura de combustión, que determina los materiales de construcción;
- ✓ El instrumental de medición;
- ✓ Las opciones de recuperación de calor; y
- ✓ Los requisitos de instalación; interior, exterior, a nivel de suelo, en el tejado, etc.

Aplicabilidad

En el momento presente, la técnica se utiliza sólo para tratar las emisiones de hornos de polimerización de lana de roca, un 60 – 70 % de instalaciones utilizan esta técnica. Debido al elevado volumen, la baja concentración, la baja temperatura, y en ocasiones el alto contenido de humedad, la técnica se considera prohibitivamente cara para el gas residual de la zona de moldeo. En principio, la técnica es igualmente aplicable a procesos nuevos y existentes.

Los hornos de polimerización de lana de roca están diseñados para funcionar con diferenciales de presión relativamente elevados debido a la baja permeabilidad al aire del producto. Esto produce un control de presión relativamente sofisticado y produce un bajo caudal de escape a alta temperatura que varía según el producto fabricado, y hace que la incineración sea atractiva.

Los hornos de polimerización de lana de vidrio requieren un menor diferencial de presión y no precisan un rango de control tan grande, y el gas residual tiene generalmente un volumen mayor y una menor temperatura. Esto hace que la incineración sea una opción menos atractiva, y en combinación con la disponibilidad de agua de proceso ha hecho que la industria se decante por el lavado húmedo en lugar de la incineración. En los procesos de lana de vidrio existe normalmente la opción de combinar las emisiones del horno de polimerización y de la zona de moldeo para su tratamiento mediante una sola técnica, lo que suele ser más económico. En principio no hay motivo técnico por el que las emisiones de los hornos de polimerización de lana de vidrio no puedan eliminarse por incineración. No obstante, generalmente será más caro que en los procesos de lana de roca, y puede no representar la opción más eficaz desde el punto de vista económico.

Consideraciones asociadas

Ventajas:

- Elevada eficacia de destrucción de contaminantes orgánicos y olores.
- No se generan residuos acuosos o sólidos.
- Costes relativamente bajos en aplicaciones apropiadas.

Desventajas:

- Se consume energía, dado que el valor calorífico del gas no es suficiente para sustentar la combustión.
- Se emite dióxido de carbono y óxidos de nitrógeno.
- Mala eficacia de eliminación de partículas inorgánicas.
- Costes considerablemente mayores para los procesos de lana de vidrio.

Tabla 4.28: Principales ventajas y desventajas de la incineración

Instalaciones de ejemplo

Rockwool Lapinus, Roermond, Holanda

Partek Rockwool, Hallekis, Suecia

Owens Corning, Queensferry, Reino Unido

4.5.6.3. Enfriamiento del Producto

Debe pasarse una gran cantidad de aire (normalmente de 10.000 a 40.000 Nm³/h) a través del producto para enfriarlo a una temperatura aceptable tras salir del horno. Este gas puede contener fibra, partículas o aglomerante polimerizado, así como niveles bajos de vapores orgánicos que pueden ser olorosos. Esta corriente de gas no es un aspecto principal dentro del sector, pero puede causar problemas locales. Hay tres métodos principales de tratar el gas, con ejemplos de todos ellos en el sector, y todos son aceptados como disponibles y accesibles. Los tres métodos pueden conseguir niveles de emisiones relativamente bajos, y la opción preferida dependerá de las circunstancias locales. En algunos casos, si las emisiones son muy bajas, la eliminación secundaria puede no ser necesaria.

- Un sistema de filtro para eliminar polvo en combinación con una velocidad de evacuación y altura suficiente para evitar olores a nivel de suelo.
- Un sistema de lavado húmedo en combinación con una dispersión adecuada. Un sistema de tipo Venturi daría las emisiones de partículas y vapores más bajas.
- Combinación del aire de enfriamiento con el sistema de tratamiento de gas residual de la zona de moldeo o del horno de polimerización.

La opción de combinación es probablemente el método más eficaz desde el punto de vista medioambiental y económico.

4.5.6.4. Mecanización y Embalaje del Producto

Los procesos de lana mineral comportan una serie de operaciones de recorte, corte y rajado del producto, que generan emisiones de polvo. La forma aceptada de tratar estas emisiones es mediante una recogida y aspiración eficaz, pasando luego el aire extraído a través de un sistema eficaz de eliminación de polvo, normalmente un filtro de mangas. Las operaciones de embalaje son también posibles fuentes de emisiones de polvo y deben tratarse del mismo modo.

Los volúmenes de gas de estas operaciones pueden variar ampliamente (5.000 – 70.000 Nm³/h). Con el fin de minimizar los costes de inversión y operación del equipo de eliminación, los volúmenes de aire extraídos deben reducirse al mínimo compatible con una buena recogida de polvo.

4.5.6.5. Olores Derivados de la Producción de Lana Mineral

La evaluación técnica de los olores es difícil, costosa y potencialmente subjetiva, y hay poca información disponible. No obstante, las instalaciones de lana mineral pueden ser la fuente de quejas de olores por parte de los residentes locales. Este problema se ha reducido en años recientes debido a la mejor operación y control, pero todavía es un aspecto a tener en cuenta para muchas instalaciones. Esta sección discute los olores de todas las partes del proceso, incluida la fusión.

Los hornos convencionales con combustión aire-gas, y los hornos con oxicomustión, no dan normalmente a problemas de olores, ni siquiera cuando se funde material reciclado, debido a las elevadas temperaturas. Los hornos de fusión eléctricos de parte superior fría raramente causan problemas de olor, pero pueden hacerlo si se reciclan residuos de lana mineral. Las sustancias que componen el aglomerante pueden sufrir una descomposición térmica parcial durante el proceso de fusión, y pueden emitirse algunas sustancias olorosas. Este problema puede minimizarse mediante la adición de agentes oxidantes o con el pretratamiento de la fibra.

La fusión en cubilote origina emisiones considerables de sulfuro de hidrógeno, de fuerte olor. La solución aceptada es su combustión en un sistema de postcombustión, que también se encarga de otras emisiones olorosas de materiales reciclados o materias primas.

Las principales fuentes de olor son de las operaciones de acabado, particularmente el moldeo y la

polimerización. Los olores pueden también derivarse del enfriamiento de los productos, particularmente de productos densos o con elevado contenido de aglomerante, o si se ha producido un cierto grado de sobrepolimerización. El olor de los compuestos químicos individuales utilizados en el proceso no se considera muy significativo. Los olores se derivan principalmente de las reacciones térmicas y químicas del aglomerante orgánico utilizado en el proceso. El olor característico es de "Bakelite quemada". Las quejas de olores de formaldehído o amoniaco son muy raras fuera de la planta.

Se cree que la mayoría de olores se originan en el horno de polimerización, donde tienen lugar las principales reacciones químicas y procesos térmicos. El proceso de secado origina asimismo una cierta cantidad de destilación de vapor de los componentes del aglomerante y compuestos intermedios. El interior de la mayoría de hornos de polimerización muestra una acumulación de material fibroso o resinoso, que también puede originar compuestos resinosos bajo la influencia de la temperatura del horno. Los pequeños incendios y casos localizados de combustión sin llama no son infrecuentes en los hornos de polimerización, y el humo y los vapores emitidos pueden ser muy olorosos.

Los casos de olores pueden reducirse enormemente mediante un buen mantenimiento y limpieza del horno, sistemas de lavado húmedo, una dispersión adecuada y previsión para la rápida extinción de los incendios. La incineración de los gases residuales del horno de polimerización es una solución muy eficaz al problema.

Las actividades de la zona de moldeo pueden también producir la formación de compuestos olorosos, particularmente cuando se pulveriza aglomerante sobre las fibras calientes. No obstante, la atmósfera es más fría y por lo tanto más húmeda que en el horno de polimerización, y los volúmenes de gas son mucho mayores, con lo que las concentraciones de los componentes olorosos se diluyen. Aunque puede emitirse una cantidad significativa de compuestos olorosos de la zona de moldeo, un olor sólo "existe" si el compuesto tiene una concentración por encima del umbral de olor, por lo que las emisiones de la zona de moldeo son generalmente menos olorosas que las del horno de polimerización. Si las emisiones de la zona de moldeo originan olores, éstos pueden minimizarse mediante lavado y dispersión adecuada. Los olores problemáticos pueden tratarse mediante lavado húmedo utilizando un agente oxidante, aunque debería estar separado del sistema de agua de proceso. Los aspectos del lavado húmedo químico se discuten en la Sección 4.5.6.1.2.

Sustancia mg/Nm ³ (kg/tonelada del producto)	Partículas	Fenol ⁽¹⁾	Formaldehido ⁽¹⁾	Amoniaco ⁽¹⁾	NO _x	CO ₂
Fibrado y moldeo						
Medidas primarias	100 (3,6)	20 (0,8)	15 (0,5)	125 (4,0)		
Filtro de lana de roca	20 (0,7)	15 (0,5)	10 (0,4)	75 (2,5)		
Lavador de impacto + ciclón	50 (1,8)	15 (0,6)	8 (0,3)	65 (3,0)		
Lavador de impacto + ciclón + PEH	20 (1,2)	15 (0,6)	8 (0,3)	65 (3,0)		
Lavador de impacto + ciclón + LLR	50 (1,8)	12 (0,5)	5 (0,25)	50 (2,5)		
Combinación de polimerización y moldeo						
Medidas primarias	100 (4,0)	20 (0,9)	15 (0,6)	125 (8,0)		
Lavador de impacto + ciclón	50 (2,0)	15 (0,7)	8 (0,4)	65 (5,0)		
Lavador de impacto + ciclón + PEH	20 (1,3)	15 (0,7)	8 (0,4)	65 (5,0)		
Lavador de impacto + ciclón + LLR	50 (2,0)	12 (0,6)	5 (0,3)	50 (4,0)		
Polimerización sola						
Medidas primarias	30 (0,4)	25 (0,1)	25 (0,1)	400 (4,0)	150 (0,5)	60.000 (20)
Incineración	20 (0,1)	5 (0,02)	5 (0,02)	100 (0,4)	200 ⁽³⁾ (0,6)	80.000 ⁽³⁾ (2)
Lavador de impacto + ciclón	30 (0,2)	10 (0,1)	8 (0,1)	65 (2,0)	150	
Lavador de impacto + ciclón + PEH	20 (0,1)	10 (0,1)	8 (0,1)	65 (2,0)	150	60.000 (20)
Lavador de impacto + ciclón + LLR	30 (0,2)	8 (0,1)	5 (0,1)	50 (1,5)	150	

Tabla 4.29: Valores generales alcanzables para emisiones a la atmósfera de la línea de producción (mg/Nm³)

Notas: PEH = Precipitador Electrostático Húmedo; LLR = Lavador de Lecho Relleno; COV = Compuestos Orgánicos Volátiles

(1) La emisión de compuestos relacionados con el aglomerante depende de la formulación del aglomerante, de la tecnología de proceso, del ritmo de producción, de la demanda de productos específicos, etc.

Estas cifras representan los niveles de emisiones que pueden alcanzarse en la gran mayoría de plantas mediante estas técnicas. Las medidas primarias consisten principalmente en modificaciones en las formulaciones de la resina o del aglomerante, y estas modificaciones no pueden aplicarse a todos los productos ni a todas las condiciones de producción. En condiciones favorables, las emisiones pueden ser considerablemente mayores que estas cifras, particularmente si sólo se usan medidas primarias. No obstante, en circunstancias favorables se han alcanzado emisiones considerablemente inferiores a estas cifras.

(2) *El número de mediciones de COV es limitado.*

(3) *El valor superior es mayor que para Medidas Primarias debido a la incineración.*

(4) *Estas cifras muestran el efecto de diversas técnicas sobre una concentración de entrada de aminas de unos 20 mg/Nm³ pero, como se ha indicado en la Sección 4.5.6.1, pueden conseguirse emisiones de aminas de <5 mg/Nm³ mediante la reformulación de la resina/aglomerante.*

Técnica de eliminación	Caudal típico (Nm ³ /h)	Coste de inversión para un proceso nuevo (M euros)	Coste de inversión para una fábrica existente (M euros)	Coste operativo (M euros/año)
Moldeo y polimerización				
Medidas primarias	-	-	-	-
Lavador de impacto + ciclón	200.000 (-50.000/+ 100.000)	1,3 ± 30 %	1,6 ± 40 %	0,1 ± 0,02
Lavador de impacto + ciclón + PEH	200.000 (-50.000/+ 100.000)	3,8 ± 30 %	4,6 ± 40 %	0,12 ± 0,02
Lavador de impacto + ciclón + LLR	200.000 (-50000/+ 100.000)	3,5 ± 30 %	4,2 ± 40 %	0,21 ± 0,02
Moldeo sólo				
Filtro de lana de roca	200.000 (± 50000)	1,3 ± 30 %	1,5 ± 30 %	0,2 ± 0,1
Polimerización sola				
Incinerador	20.000 (-5.000/+ 10.000)	1,3 ± 40 %	1,6 ± 30 %	0,2 ± 0,1
Chimenea	250.000 (-50.000/+ 100.000)	0,7 ± 40 %	0,8 ± 40 %	

Tabla 4.30: Costes de inversión y costes operativos de técnicas de eliminación

4.5.7. Fibra Cerámica

La principal preocupación medioambiental con los procesos de fibra cerámica es la emisión a la atmósfera de partículas, que puede incluir fibras cerámicas. Además, algunas operaciones de proceso secundario pueden originar emisiones de COV, especialmente durante las operaciones de secado y polimerización.

Las emisiones de partículas y fibras pueden generarse desde diversas áreas del proceso como: fibrado y recogida, enfurtido con agujas, combustión de lubricantes, rajado, recorte, corte, embalaje y zonas de proceso secundario. Todas las zonas en las que pueden generarse emisiones de partículas o fibras pueden ser cubiertas por un sistema de aspiración eficaz que ventile a un sistema de filtro de tejido.

Hay dos posibles enfoques para la aspiración y filtración de aire cargado de partículas:

- La instalación de plantas de filtrado especializadas cerca de la fuente de las emisiones; y

- La aspiración del aire de gran número de fuentes a una planta de filtrado común a través de un sistema colector.

El sistema de filtración más eficaz consistiría en un filtro primario seguido de un filtro secundario de gran eficacia, equipado con un monitor de caída de presión y monitorización continua de las emisiones a la atmósfera. Los filtros secundarios de alta eficacia producen menores emisiones y sirven como protección en caso de fallo del filtro primario. Cuando se extrae una serie de fuentes a un sistema común, la instalación de un filtro secundario es posible que sea desproporcionadamente cara. Los elevados caudales de aire resultantes y la alta resistencia del filtro secundario harían necesario un ventilador grande y potente con un elevado consumo energético. Un sistema de filtración primario bien diseñado y eficazmente operado es capaz de conseguir niveles de emisiones del orden de 1 - 5 mg/Nm³ (<1 mg/Nm³ para fibras).

Cuando un proceso se basa en filtros primarios, suele disponerse de alguna forma de dispositivo de seguridad como protección. Muchas plantas están equipadas con monitores de caída de presión con alarma, pero no puede dependerse exclusivamente de ellos.

Los sistemas de filtrado con el ventilador de aspiración instalado en la parte limpia del filtro de tejido (sistemas de presión negativa) son usualmente la opción preferida. Los sistemas de presión positiva, con el ventilador en el lado sucio, presentan riesgos potenciales, ya que cualquier fuga en el sistema después del ventilador producirá la emisión de materias.

Los ciclos de limpieza de los filtros de tejido pueden optimizarse para garantizar una máxima eficacia de filtración. En algunas aplicaciones, particularmente las que tienen emisiones fibrosas, los mecanismos de sacudidas pueden ser más eficaces que los sistemas de chorro inverso. Debido a la naturaleza del material recogido, es importante asegurar que se manipule y deseche de forma que se evite toda emisión a la atmósfera o al agua. En algunos casos, puede ser posible reciclar el material recogido al horno.

Pueden generarse emisiones orgánicas durante la quema de lubricantes, o de las operaciones de polimerización y secado durante el proceso secundario. La experiencia práctica ha demostrado que estas emisiones tienden a ser muy bajas. No obstante, si las emisiones son considerables (Ej. >100 g/hora), pueden controlarse mediante medidas de formulación o mediante técnicas de eliminación estándar, como incineración o absorción.

4.5.8. Fritas

La producción de fritas no presenta emisiones específicas significativas a la atmósfera en las actividades de acabado. La trituración y molienda del producto se realiza normalmente en húmedo, pero pueden ser necesarias medidas de control de polvo si se realiza molienda en seco, y posiblemente en zonas de embalaje de producto seco. La técnica más eficaz suele ser la aspiración seguida de un sistema de filtro de mangas.

4.6. Técnicas para el Control de las Emisiones al Agua

En general, las emisiones al medio acuático son relativamente bajas y hay pocos aspectos específicos que sean específicos de la Industria del Vidrio. Este documento no cubre los aspectos generales de contaminación del agua que son comunes a muchos procesos industriales y que se discuten con gran detalle en la bibliografía técnica. Esta sección resume brevemente estos aspectos generales, y si es apropiado proporciona mayor información sobre los aspectos que son específicos de la Industria del Vidrio. En general, el agua se utiliza principalmente para limpieza y enfriamiento, y puede reciclarse o tratarse fácilmente mediante técnicas estándar. Las principales fuentes potenciales de contaminación del agua son las siguientes:

- ✓ Desagüe de aguas superficiales.
- ✓ Vertidos o fugas del almacenamiento de materias primas.

- ✓ Agua de desagüe de zonas contaminadas con materias líquidas o sólidas.
- ✓ Agua utilizada para limpieza de los productos.
- ✓ Agua de refrigeración y purgas de agua de los circuitos cerrados de refrigeración.
- ✓ Efluentes de los lavadores húmedos.

Excluyendo el agua residual doméstica, las evacuaciones generalmente contienen sólo sólidos del vidrio, algo de contaminación por aceite, algunas materias solubles para fabricación de vidrio (Ej. sulfato sódico) y los productos químicos de tratamiento del sistema de refrigeración. Cuando se utilicen sustancias potencialmente nocivas, pueden tomarse medidas para evitar que entren en el circuito de agua. Si es factible, pueden usarse sistemas de refrigeración cerrados y minimizar las purgas. Pueden usarse técnicas estándar de control de la contaminación para reducir más las emisiones si es necesario. Por ejemplo: sedimentación, cribado, separadores de aceite, neutralización y vertido a los sistemas municipales de alcantarillado.

Puede usarse las buenas prácticas estándar para controlar las emisiones del almacenamiento de materias primas líquidas y compuestos intermedios:

- ✓ Existencia de depósitos de contención del tamaño apropiado (recintos).
- ✓ Inspección / ensayo de los tanques y recintos de contención para asegurar su integridad.
- ✓ Protección contra rebose (válvulas de desconexión, alarmas, etc.).
- ✓ Posición de los respiraderos y puntos de llenado dentro del recinto u otro elemento de contención.

Los aspectos que se consideran específicos para la industria del vidrio son:

- ✓ Sistemas de agua de proceso de lana mineral.
- ✓ Efluentes de la producción de fibra de vidrio de filamentos continuos.
- ✓ Vidrio especial (vidrio para TV).
- ✓ Vidrio doméstico (vidrio al plomo, vidrio de cristal).

Lana de vidrio

Los procesos de lana mineral son, en circunstancias normales, consumidores netos de agua, con una emisión sustancial de vapor de agua a la atmósfera de las operaciones de moldeo, y en menor medida del polimerización. No hay evacuaciones inherentes de aguas residuales, excepto por los aspectos generales arriba mencionados. La mayoría de procesos utilizan un sistema de agua de proceso de circuito cerrado (ver Figura 2.11), y cuando es factible las purgas de agua de refrigeración y las aguas de limpieza se incorporan a dicho sistema. Las aguas de limpieza de proceso y los vertidos de aglomerante se reciclan normalmente al circuito de agua de proceso.

El sistema de agua de proceso tiene un volumen limitado pero puede estar diseñado para incluir un tanque de retención que alberge las sobrecargas de volumen, que luego pueden reintroducirse en el sistema. La mayor parte de las materias utilizadas en el proceso son compatibles con la composición química del agua de proceso. Pequeñas cantidades de agua contaminada pueden escaparse de los recintos químicos e interceptadores de vertidos y aceites. Cuando estas materias no son compatibles con el agua de proceso, pueden dirigirse a un tanque de retención. Debido a los volúmenes muy bajos de estas materias, normalmente se vierten a la red de alcantarillado o se envían al exterior para su vertido. Podrían utilizarse las técnicas detalladas en la Tabla 4.31, pero es improbable que sean económicamente viables para estos volúmenes tan pequeños.

El gran volumen de agua de proceso representa un potencial de contaminación de los circuitos de agua limpia como el agua superficial o el agua de enfriamiento del vidrio recuperado. Los sistemas pueden diseñarse y utilizarse para minimizar este riesgo. Por ejemplo, los sistemas de agua limpia deben ser herméticos cuando pasan a través de zonas en las que pueda producirse contaminación.

Fibra de Vidrio de Filamentos Continuos

Las emisiones se originan de las zonas de moldeo, preparación del aglomerante, limpieza, enfriamiento, aplicación de aglomerante de tejido/manta, y de los sistemas de lavado a base de agua. La principal fuente de emisiones es la zona de moldeo. Debido a la elevada velocidad de las bobinadoras y el movimiento de los filamentos durante el proceso de moldeo, una parte del aglomerante aplicado sale expulsado. Los principales contaminantes en el agua residual sin tratar son los aglomerantes en sí. Con procedimientos de manipulación cuidadosos, particularmente en la zona de preparación del aglomerante, pueden reducirse significativamente los niveles de emisiones de otras zonas.

Las sustancias contaminantes y sus concentraciones variarán bastante debido a las variaciones en los sistemas de aglomerantes usados y las prácticas operativas. Las concentraciones de contaminantes en el agua residual son en ocasiones bastante bajas debido a la dilución con el agua de lavado, aunque normalmente contienen elevados niveles de contaminantes orgánicos derivados de los materiales aglomerantes. El efluente deberá normalmente verterse a la red de alcantarillado municipal o tratarse *in situ* con una combinación apropiada de las técnicas detalladas en la Tabla 4.31. Si el efluente debe verterse directamente a un curso de agua, el tratamiento *in situ* más eficaz suele ser el tratamiento biológico. No obstante, requiere gran cuidado en el diseño y operación del sistema de tratamiento, dado que la eficacia del tratamiento biológico se ve en ocasiones comprometida por el elevado porcentaje de sustancias poliméricas.

Vidrio Especial

El Sector de Vidrio Especial es muy diverso y no es posible detallar todas las posibles emisiones al agua y las técnicas de eliminación apropiadas. La mayoría de actividades de este sector sólo comportan los aspectos generales de aguas residuales descritos anteriormente. No obstante, la fabricación de determinados productos, particularmente el vidrio para TV, comporta operaciones de esmerilado o pulido húmedo. Esto origina una corriente acuosa que contiene los auxiliares de esmerilado y pulido, y vidrio fino que puede contener plomo. Esta corriente residual puede tratarse mediante una combinación de las técnicas estándar de eliminación de sólidos detalladas en la Tabla 4.31 inferior. El plomo del vidrio es esencialmente insoluble, y el contenido total de plomo dependerá del contenido de sólidos.

Vidrio Doméstico

En general, el Sector de Vidrio Doméstico tiene muy bajas emisiones al agua. En común con otros sectores de la industria, los principales usos del agua son refrigeración y limpieza, y las emisiones acuosas contienen las purgas del sistema de agua de refrigeración, las aguas de limpieza, y la circulación de aguas superficiales. No obstante, determinadas actividades, en particular la producción de vidrio al plomo y de vidrio de cristal tienen asociadas emisiones más específicas, a saber:

- El agua utilizada en las operaciones de corte contiene auxiliares de corte y cantidades de partículas de vidrio finas. Este efluente puede tratarse mediante técnicas estándar de separación de sólidos. El agua puede reutilizarse para minimizar los niveles de emisiones del corte, aunque deberá purgarse un pequeño volumen del circuito. El plomo contenido en el vidrio es esencialmente insoluble.
- Tras su inmersión en ácido, el vidrio tiene una capa de sulfato de plomo en la superficie. Ésta se lava con agua caliente, que se hace ácida y contiene sulfato de plomo soluble. Este efluente puede tratarse mediante una combinación de técnicas químicas y físicas. El sulfato de plomo puede hacerse reaccionar para precipitar el plomo (por ejemplo, con carbonato cálcico para dar carbonato de plomo), que puede luego eliminarse, normalmente mediante coagulación y floculación

seguidas de una separación física. Utilizando estas técnicas debe ser posible reducir los de plomo a <0,5 mg/l.

- El residuo ácido de los lavadores húmedos requiere su neutralización antes de ser vertido. Alternativamente, puede recuperarse ácido hexafluorosilícico y venderse como producto químico.

Tratamiento Físico / Químico
• Cribado
• Separación superficial
• Sedimentación
• Centrifugación
• Filtración
• Neutralización
• Aireación
• Precipitación
• Coagulación y Floculación

Tratamiento Biológico
• Fangos activos
• Biofiltración

Tabla 4.31: Lista de posibles técnicas de tratamiento de aguas residuales para uso en la Industria del Vidrio

4.7. Técnicas para Minimizar Otros Residuos

Una característica de la Industria del Vidrio es que la mayoría de las actividades producen niveles relativamente bajos de residuos. La mayoría de los procesos no tienen caudales significativos de subproductos inherentes. Los residuos de procesos se componen de materias primas sin usar y vidrio de desecho que no ha sido convertido en producto. A continuación se discuten los principales residuos de proceso que se dan en la industria del vidrio y las técnicas empleadas para controlarlos.

Residuos de materias primas de mezcla

Se derivan de la manipulación y almacenamiento de materias primas, y si los requisitos de calidad lo permiten pueden reciclarse fácilmente al proceso. En casos en los que el material se ha acumulado, puede no ser de suficiente calidad para ser reciclado, pero la cantidad de este tipo de materiales puede minimizarse mediante las técnicas descritas en la Sección 4.3.

Polvo recogido de las corrientes de gas residual

En la mayoría de casos, este material puede reciclarse al proceso. Si se utilizan absorbentes de gases ácidos, normalmente puede escogerse para que sean compatibles con las materias primas y permitan su reciclaje, aunque puede ser necesario ajustar la composición de la mezcla. Este aspecto se discute con más detalle en la Sección 4.4.1.

En los hornos regenerativos se deposita una cantidad sustancial de polvo en los regeneradores durante la campaña del horno. Durante la reconstrucción / reparación, este material se desprende y se desecha en un vertedero legal apropiado. Normalmente no es factible reciclar este material.

Material de fusión no convertido en producto

Este residuo se origina principalmente de las interrupciones en los procesos de moldeo, por averías o cambios de producto. La técnica utilizada más comúnmente y más eficaz es enfriar y fragmentar el material fundido en agua, y luego usar el vidrio de desecho formado de esta manera directamente como materia prima. Hay una serie de ejemplos en los que esto no es factible o no se aplica.

En el proceso de vidrio flotado, las interrupciones en la producción se producen normalmente tras el baño de flotación, por lo que el residuo es normalmente un vidrio sólido, que también puede romperse y reciclarse como vidrio recuperado. De forma similar, en la producción de fibra de vidrio de filamentos continuos, las interrupciones ocurren generalmente tras la formación de la fibra, y los residuos son fibra. Otra fuente de este tipo de residuo es el vidrio de drenaje, que procede de la aspiración de un caudal de

vidrio fundido del fondo del canal para eliminar las partículas más densas sin fundir. Si no se eliminan, estas partículas pueden causar problemas de fibrado, que podrían producir costosos daños y un aumento de los residuos. El reciclaje interno de este material no es normalmente deseable, dado que supondría la devolución al horno de las impurezas separadas, que volverían a las hileras. Esto podría producir una acumulación gradual de material no fusible y potencialmente un mayor nivel de residuos debido a problemas de fibrado. En algunos casos, es posible reciclar este material en otras partes de la Industria del Vidrio.

En la fibra cerámica, ha habido poco incentivo económico para reciclar el material de fusión residual, pero la práctica se va extendiendo a medida que aumentan los costes de tratamiento de los residuos.

En la producción de lana de roca, los materiales finos no pueden reciclarse al cubilote, dado que interrumpirían el flujo de aire dentro del lecho de material. Este problema puede superarse briquetando el material de desecho formando piezas de tamaño comparable a las materias primas normales. Esta técnica se utiliza ampliamente en la actualidad y puede considerarse como probada desde el punto de vista económico y técnico, aunque su economía varía con la escala. La granalla de lana de roca (ver Sección 3.8.4) puede también reciclarse de este modo.

Producto de desecho

Esta categoría incluye el material no conforme a las especificaciones, los recortes de bordes, el producto de desecho de cambios o roturas, y las muestras de prueba de calidad. Siempre que sea posible, es preferible tomar medidas para minimizar este tipo de residuos a su reciclaje; por ejemplo, los recortes de bordes pueden reducirse al mínimo tamaño. Estas medidas suelen también producir beneficios económicos.

Los residuos “duros”, como por ejemplo los bordes de recorte de vidrio plano y los desechos de vidrio para envases, se reciclan fácilmente como vidrio recuperado tras su trituración. En algunas instalaciones, esto puede ser imposible debido a variaciones en la formulación del producto, o simplemente debido a que no se considera atractivo económico. En teoría, todos los residuos de vidrio “duro” pueden reciclarse de este modo.

En el Sector de Lana Mineral, estos residuos de producto son fibrosos, por lo que no pueden reciclarse directamente al horno. La solución a esto es triturar o molturar el material y luego reciclarlo como polvo a hornos de cuba, o a través del proceso de briquetado para cubilotes de lana de roca. Aunque aparentemente es simple, esta técnica es bastante cara y sólo recientemente ha comenzado a ser económicamente viable debido a los costes crecientes de desecho. En el momento presente, esta técnica no es práctica común. Otro problema en la producción de lana de vidrio es el contenido orgánico del material, que debe oxidarse en el horno. Esto normalmente requiere un mayor uso de nitratos, que se descomponen, liberando NOx. Cuando es posible, los residuos fibrosos se procesan y venden como lana de soplado. Los desechos del recorte de bordes son normalmente triturados y reciclados al velo de fibra. Existe un límite en la cantidad de residuos que pueden reciclarse de este modo (sólo recortes de bordes), y normalmente no puede hacerse para productos que requieran una alta resistencia.

Los residuos fibrosos del Sector de Fibra Cerámica presentan los mismos aspectos que la Lana Mineral. En el momento presente no se conocen ejemplos de reciclaje de residuos fibrosos, aunque en principio sería posible. El residuo podría triturarse para producir un polvo y luego, si es necesario, calentarlo para quemar los compuestos orgánicos. Las consecuencias medioambientales y económicas de este enfoque no lo hacen una opción atractiva. Prosiguen los desarrollos en este campo.

La producción de fibra de vidrio de filamentos continuos supone requisitos de calidad muy altos, y en el momento presente no se conocen ejemplos de producción a plena escala en la que se reciclen desechos de fibra al horno. Al parecer, el problema es el componente orgánico de la fibra.

Residuos sólidos de los sistemas de tratamiento de las aguas residuales

En general, los residuos separados de los sistemas de tratamiento agua de proceso no se reciclan, sino que se envían al vertedero. En algunos sectores, particularmente el vidrio doméstico (lodo de corte de

vidrio al plomo) hay iniciativas en curso para recuperar y valorizar estos residuos. En la mayoría de sectores no es económicamente viable recuperar estos residuos, debido a los bajos volúmenes o a su composición imprevisible o contaminada.

El reciclaje de residuos de consumo (Ej. de recogida de envases) no se discute en esta sección, dado que no se trata de un residuo de proceso y por lo tanto está fuera del ámbito de la IPPC. No obstante, su uso tiene importantes efectos en el proceso y se considera en las Secciones 4.4. y 4.8. Además, esta práctica reduce el consumo de materias primas vírgenes, lo que es una consideración positiva en el marco de la IPPC.

4.8 Energía

La fabricación de vidrio es un proceso con un consumo intensivo de energía, y las opciones escogidas de fuente de energía, técnica de calentamiento y método de recuperación de calor son básicas en el diseño del horno y en la rentabilidad económica del proceso. Las mismas opciones son también algunos de los factores más importantes que influyen sobre el comportamiento medioambiental y la eficacia energética de la operación de fusión. En general, la energía necesaria para la fusión supone más del 75% de los requisitos totales de energía de la fabricación de vidrio. Esta sección se concentra en las técnicas para reducir el consumo energético de las actividades de fusión.

El coste de la energía para la fusión es uno de los principales factores que influyen en los costes operativos de las instalaciones de fabricación de vidrio, y los productores tienen un importante incentivo en la reducción del consumo de energía. El ahorro económico ha sido tradicionalmente la motivación para aplicar técnicas de ahorro de energía, pero recientemente los aspectos medioambientales han aumentado en importancia. En los hornos con combustión de combustibles fósiles, el consumo energético afecta asimismo las emisiones por tonelada de vidrio de las sustancias relacionadas directamente con la cantidad de combustible fósil quemado, especialmente CO₂, SO₂ y NO_x, aunque también partículas. Estos aspectos se discuten en las secciones específicas de cada sustancia de este capítulo.

El consumo de energía y los principales factores que afectan la eficacia energética se discuten en el Capítulo 3. Este capítulo discute las técnicas para mejorar la eficacia de los hornos.

4.8.1. Técnica de Fusión y Diseño del Horno

[tm18 CPIV, tm5 EEO, tm14 ETSU]

La elección de técnica de fusión tiene gran efecto sobre la eficacia energética. La elección viene determinada en gran medida por una serie de consideraciones económicas. El principal factor es el ritmo de producción deseado y los costes asociados de inversión y operación a lo largo de la vida del horno. Un aspecto importante de los costes operativos es el consumo energético, y en general el productor escogerá el diseño más eficaz posible desde el punto de vista energético.

En los hornos convencionales con combustión de combustibles fósiles, la principal diferencia en el diseño del horno es si el sistema de recuperación de calor se basa en regeneradores o en un recuperador. Las diferencias en el diseño y el funcionamiento se discuten en el Capítulo 2. Uno de los principales factores en la elección es el tamaño del horno, que se discute con más detalle en la Sección 4.2.

Los hornos regenerativos alcanzan una mayor temperatura de precalentamiento de los gases de combustión, de hasta 1400 °C frente a 800 °C en los hornos de recuperación, lo que produce mejores eficacias de fusión. El tamaño generalmente mayor de los hornos regenerativos hace también que sean más eficaces desde el punto de vista energético que los hornos de recuperación, de menor tamaño. Esto es debido a que las pérdidas estructurales son inversamente proporcionales al tamaño del horno, siendo el principal motivo el cambio de la relación entre superficie y volumen. Un moderno horno regenerativo de vidrio para envases tiene una eficacia térmica global de alrededor del 50%, con pérdidas de gases residuales de alrededor del 20%, y el resto está compuesto en su gran mayoría por pérdidas estructurales. La eficacia térmica de un horno de recuperación sin recuperación de calor estará más próxima al 20%.

Los hornos regenerativos pueden ser de llama de bucle o de llama transversal. Los hornos de llama de bucle son más eficaces térmicamente (hasta un 10%), pero el control de combustión es más limitado y hay un límite superior al tamaño del horno (actualmente alrededor de 150m² en vidrio para envases). Los hornos de vidrio flotado son menos eficaces que los hornos de vidrio para envases, dado que el ritmo de producción específico de un horno de flotado es mucho menor debido a requisitos de calidad.

La energía recuperada por los regeneradores puede maximizarse aumentando la cantidad de ladrillos refractarios utilizados. En la práctica, éstos pueden organizarse en cámaras regenerativas ampliadas o en estructuras separadas pero conectadas, lo que da origen al término de regeneradores multipasos. Se aplica la ley de los rendimientos decrecientes, al acercarse asintóticamente la eficacia del regenerador a su límite máximo. Las principales limitaciones son el coste de los ladrillos refractarios adicionales y, en el caso de hornos existentes, la limitación del espacio disponible y el coste adicional de modificación de las infraestructuras del horno. Este principio se aplica más comúnmente a los hornos de llama de bucle debido a la geometría simple de sus regeneradores, aunque se han realizado algunas aplicaciones en hornos de llama de bucle. La modificación de las estructuras de los regeneradores en los hornos existentes (si es técnica y económicamente viable de acuerdo con el esquema de la planta) sólo puede hacerse durante la reconstrucción del horno. El consumo de energía puede reducirse hasta un 15% con respecto al horno equivalente con regeneradores normales de paso simple.

El único impacto negativo es el mayor volumen de materiales refractarios que deberán manejarse al final de la vida del horno. Este impacto negativo es limitado, dado que una parte importante de los ladrillos refractarios adicionales pueden soportar una o más campañas del horno, y existen soluciones, y se siguen desarrollando otras, para el reciclaje de estos materiales. Aunque las mayores temperaturas de precalentamiento del aire de los hornos equipados con regeneradores multipasos pueden ser un factor que aumente la temperatura de las llamas y con ello la formación de NOx, en la práctica estos hornos no presentan elevados niveles de NOx si se toman medidas apropiadas de reducción en origen.

Hay una serie de materiales disponibles para su uso como medios de almacenamiento de calor y como relleno en regeneradores. La solución más simple es utilizar ladrillos refractarios apilados siguiendo un patrón abierto o de “tipo mimbre”, lo que generalmente da una eficacia de regeneración de alrededor del 50% (calor recuperado por el aire en relación al calor contenido en el gas residual). No obstante, la transferencia de calor puede mejorarse usando materiales con formas especiales y de fundición. Por ejemplo, los cruciformes corrugados de fundición mejoran la eficacia de intercambio de calor en comparación con los rellenos de ladrillos normales, y permiten ahorros medios de combustible de un 7%. Además, estos materiales son muy resistentes al ataque químico por las sustancias volátiles presentes en la corriente de gas residual y muestran un deterioro mucho menor (en comparación con los ladrillos) a lo largo de la campaña. Hasta la fecha, se han reportado unas 320 instalaciones de cruciformes corrugados en todo el mundo, 120 de ellos en la UE.

La eficacia teórica máxima de un regenerador es del 80%, dado que la masa de gases residuales de un horno es mayor que la del aire de combustión entrante, y la capacidad de los gases de escape es mayor que la del aire de combustión. En términos prácticos, la eficacia estará limitada por el coste, y las pérdidas estructurales se harán más significativas a medida que aumenta el tamaño de los regeneradores. Es difícil concebir un diseño de regenerador económico con una eficacia superior al 70 – 75%.

La geometría del horno es mejorada constantemente para optimizar las corrientes térmicas y la transferencia de calor, tanto para mejorar la calidad del vidrio como para ahorrar energía. Sólo es posible realizar cambios en la geometría del horno en hornos nuevos o reconstrucciones.

La fusión eléctrica, parcial o al 100%, mejora la eficacia energética si se considera a nivel del centro de producción pero, cuando se tienen en consideración la eficacia de producción de electricidad y las pérdidas de distribución, la situación es menos clara. Estas técnicas se describen con mayor detalle en la Sección 4.2. La oxícombustión puede producir un menor consumo energético, aunque éste es un tema complejo que se discute con mayor detalle en la Sección 4.4.2.5.

Los avances en lo materiales refractarios a lo largo de las últimas décadas han permitido que los hornos funcionen con campañas más largas y con mayores niveles de aislamiento. La limitación de la temperatura a la que puede someterse la superestructura del horno era en el pasado un factor limitante de los elevados niveles de aislamiento. Hoy, el aislamiento debe estar cuidadosamente diseñado según la parte del horno y las condiciones operativas (temperatura, tipo de vidrio, etc.). No todas las partes del horno pueden aislarse. La línea de flujo y la garganta deben dejarse sin aislar y deberán estar refrigeradas para extender la vida del horno. La mayoría de refractarios en contacto con el vidrio y de la superestructura son materiales de fundición muy densos y de baja porosidad, y pueden resistir el vidrio líquido y los componentes volátiles en la superestructura. Tienen una elevada conductividad térmica y necesitan, en general, un buen nivel de aislamiento, que conduce a un ahorro sustancial energía. En el vidrio sodocálcico, la bóveda es de sílice y fuertemente aislada. Este material limita la temperatura del horno a 1.600 – 1.620 °C. Cualquier aumento en la temperatura del horno puede también afectar negativamente las emisiones de NOx y las emisiones derivadas de los componentes volátiles de la mezcla.

Puede aplicarse aislamiento adicional a ciertas zonas del horno con escaso riesgo de daños estructurales. El aislamiento mediante rociado de fibra puede reducir significativamente las pérdidas de calor si se aplica a la estructura del regenerador. Esta sencilla y económica técnica puede reducir las pérdidas de calor estructurales del horno en hasta un 50% y producir ahorros de energía del orden del 5%. También tiene la ventaja adicional de que el material sellará eficazmente las grietas en la estructura del regenerador, reduciendo la entrada de aire frío y la salida de aire caliente.

4.8.2. Control de Combustión y Elección de Combustible [tm5 EEO, tm14 ETSU]

En décadas recientes, el combustible predominante para la fabricación de vidrio ha sido el fuel-oil, aunque la popularidad del gas natural va en aumento. La combustión de gas natural produce menores emisiones de SOx, aunque generalmente origina mayores emisiones de NOx. Esto es debido a que la llama del gas natural es menos radiante y generalmente ha dado lugar a un mayor consumo de energía, aproximadamente un 7 - 8% más. No obstante, a medida que aumenta la experiencia con la combustión a gas, pueden alcanzarse niveles que se acercan progresivamente a los asociados con la combustión de fuel-oil. El gas natural tiene un mayor contenido de hidrógeno en relación con el de carbono, y su uso reduce las emisiones de CO₂ hasta un 25 % para un ritmo de producción dado.

Los desarrollos en sistemas de quemadores de bajo nivel de NOx han producido asimismo ahorros de energía. Reduciendo la cantidad de aire de combustión hasta niveles casi estequiométricos, se pierde menos energía en el gas residual. Las mejoras realizadas en el sistema de combustión, los sistemas de transferencia de calor y el control general de proceso, durante los desarrollos con vistas a la reducción de NOx, han llevado en muchos casos a mejoras en el funcionamiento y la eficacia de los hornos.

Una técnica utilizada con frecuencia en el pasado para mejorar la eficacia energética y la productividad era el enriquecimiento con oxígeno del aire de combustión. La reducción en los volúmenes de gas y el aumento de las temperaturas de llama mejoran la eficacia energética, pero a menos que la técnica sea parte de un sistema global controlado de combustión de bajo nivel de NOx, los niveles de NOx pueden verse sustancialmente incrementados. El uso de esta técnica aisladamente es cada vez menos frecuente debido a estos problemas medioambientales.

4.8.3. Uso de Casco de Vidrio [tm29 Infomil, tm14 ETSU]

El uso de casco en un horno de vidrio puede reducir significativamente el consumo de energía, y su uso es generalmente aplicable a todos los tipos de hornos, es decir, de combustibles fósiles, de oxicom-bustión y eléctricos. La mayoría de sectores de la Industria del Vidrio reciclan de forma rutinaria todo el vidrio de desecho interno. Las principales excepciones son la fibra de vidrio de filamentos continuos (donde no se considera posible debido a restricciones de calidad) y la producción de lana de roca y de fritas (en las que no se produce vidrio de desecho como tal). El nivel normal de vidrio de desecho interno en la mezcla es normalmente de un 10 a un 25%.

El casco de vidrio consume menos energía de fusión que las materias primas que lo componen, dado que las reacciones endotérmicas asociadas con la formación del vidrio ya han sido realizadas y su masa es un 20% menor que la de las materias primas equivalentes. Por consiguiente, el aumento del nivel de casco de vidrio en la mezcla tiene el potencial de ahorrar energía, y por regla general cada 10% adicional de casco de vidrio produce una reducción del 2,5 – 3,0 % en el consumo de energía del horno. El uso de casco de vidrio produce normalmente un ahorro significativo de costes gracias a la reducción del consumo de energía y de materias primas.

Debe hacerse una distinción entre el casco de vidrio interno (vidrio reciclado de la línea de producción) y el casco de vidrio externo (vidrio recuperado del consumo o de fuentes industriales externas). La composición del vidrio recuperado externo está menos bien definida, lo que limita su aplicación. Unos elevados requisitos de calidad del producto final pueden restringir la cantidad de casco de vidrio externo que puede utilizar un fabricante. No obstante, el sector de Vidrio para Envases está en una posición privilegiada para aprovechar el uso de cantidades considerables de casco de vidrio externo de los programas de reciclaje de envases. En el momento presente, excepto en lugares donde se han establecido programas especiales, el uso considerable de vidrio reciclado externo está restringido al sector de Vidrio para Envases y algunas áreas del sector de Lana Mineral. Los sectores del vidrio con mayores requisitos de calidad o con baja disponibilidad de casco de vidrio externo (Ej. vidrio plano) intentan en ocasiones hacer contratos con grandes consumidores para reciclar el vidrio de desecho que generan.

El uso de casco de vidrio en la producción de vidrio para envases varía desde < 20 % a >90 %, con una media en la UE de alrededor del 48%. Los índices de reciclaje varían ampliamente entre los Estados Miembros según los programas existentes para la recogida de vidrio de consumo. Los productos de vidrio para envases de alta calidad tienen niveles más bajos de casco de vidrio que los productos estándar.

En el sector de Vidrio Doméstico, las consideraciones de calidad impiden por lo general el uso de casco de vidrio externo en el proceso. El uso de vidrio de desecho interno está limitado por la disponibilidad de material de la calidad y composición correctas. Las cantidades medias de casco de vidrio interno utilizadas son del 25% para productos de vidrio sodocálcico, y de un 35% para vidrio al plomo.

Para la fabricación de vidrio al sílex (incoloro), sólo pueden tolerarse niveles muy bajos de vidrio coloreado, dado que no puede decolorarse. Por lo tanto, los programas de reciclaje son más eficaces si se incluye separación por color. En la Comunidad hay amplios suministros de vidrio recuperado verde y bronce, aunque el vidrio al sílex recuperado suele ser menos común, y debido a esta situación los hornos que funden vidrio de color trabajan con niveles más altos de casco de vidrio. La situación varía significativamente entre Estados Miembros debido a diferencias regionales; por ejemplo, es un problema en el Reino Unido, dado que el grueso de la producción es vidrio al sílex, aunque una parte importante del vidrio recuperado es de color, de botellas de vino importadas. En consecuencia, los niveles de casco en los hornos del Reino Unido son bajos en promedio.

En términos de funcionamiento del horno, elevados niveles de vidrio recuperado pueden ofrecer también otras ventajas, como menores emisiones de partículas. El casco de vidrio es más fácil de recalentar que la mezcla. La producción del horno puede también aumentar bastante, aunque hay una serie de inconvenientes para el fabricante cuando se trabaja con niveles elevados de casco.

- Las impurezas metálicas como tapones de botellas o papeles metálicos de botellas de vino pueden causar daños graves al material refractario y acortar la vida del horno. Las sustancias metálicas caen al fondo, donde se produce un fenómeno denominado “perforación del fondo”. Mediante una reacción química, las sustancias metálicas perforan orificios en el fondo del horno.
- La inclusión de cerámica, como material de alfarería insoluble en la masa fundida de vidrio, dará lugar a la aparición de “piedras” en el producto final, lo que producirá desechos de material.
- A niveles elevados de casco, el control de la composición y por lo tanto de las características físicas

cas del vidrio fundido puede verse reducido, lo que puede producir problemas de calidad del producto final. En particular, el contenido variable de materia orgánica (residuos de comida, etiquetas de papel, plásticos) puede causar problemas de estado de oxidación-reducción, lo que produce problemas de color y de afino.

- Los tapones y papeles de aluminio actúan como fuertes agentes reductores localizados, haciendo que la sílice del vidrio se reduzca a silicio metal. El silicio forma perlitas, que reducen la resistencia mecánica del vidrio, debido a las tensiones resultantes de la gran diferencia de coeficiente de dilatación térmica entre el vidrio y el silicio.

Además de los sustanciales ahorros energéticos posibles con el uso del casco de vidrio, hay una serie de otras importantes ventajas medioambientales asociadas. Las emisiones de CO₂, SOx, NOx y polvo se reducen enormemente debido al menor consumo de combustible y a las menores temperaturas del horno. Las emisiones de otras sustancias volátiles pueden también ser menores debido a la reducción de temperatura. No obstante, las impurezas del vidrio recuperado pueden producir mayores emisiones de HCl, HF y metales. Esto es particularmente relevante en áreas con elevados porcentajes de reciclaje, en las que pueden acumularse impurezas en el material reciclado. Muchas materias primas en la producción de vidrio son carbonatos y sulfatos, que emiten CO₂ y SOx en la fusión. El mayor uso de casco de vidrio reduce estas emisiones derivadas de las materias primas y reduce el consumo de materias primas vírgenes.

4.8.4. Caldera de Recuperación

El principio de esta técnica es pasar los gases residuales directamente a través de una caldera tubular apropiada con el fin de generar vapor. El vapor puede usarse para calefacción (calefacción de espacios y calentamiento del fuel-oil almacenado y de los conductos) o, a través de una turbina o motor de vapor adecuado, para impulsar equipo de producción de electricidad o elementos de la planta como compresores de aire o ventiladores de máquinas de Sección Individual (IS).

Los gases entrantes de los regeneradores / recuperadores tienen normalmente temperaturas del orden de 600 a 300 °C. La temperatura de salida determina el calor recuperable disponible, que está limitado a unos 200 °C debido al riesgo de condensación en la caldera y para asegurar un funcionamiento correcto de la chimenea. Los tubos de la caldera expuestos a los gases residuales del horno pueden quedar recubiertos por sustancias condensadas (Ej. sulfato sódico, según la composición) y deben limpiarse periódicamente para mantener la eficacia de recuperación (menos importante para las calderas situadas después de dispositivos de eliminación de polvo). La limpieza in situ puede realizarse automáticamente mediante vapor, por medios mecánicos, o mediante mantenimiento periódico.

La aplicabilidad y viabilidad económica de la técnica viene dictada por la eficacia global que puede obtenerse (incluido el uso eficaz del vapor generado). En la práctica, las calderas de recuperación sólo se han considerado para recuperar calor residual después de sistemas de regeneración / recuperación, y se cree que hay al menos dos ejemplos con hornos de oxicombustión. En muchos casos, la cantidad de energía recuperable es baja para una producción eficaz de energía, y en general es sólo una posibilidad para hornos de recuperación, para instalaciones grandes, o cuando existe la posibilidad de agrupar los gases de varios hornos. Las calderas de recuperación se utilizan industrialmente en algunas instalaciones de producción de vidrio para envases, pero la mayoría de aplicaciones son en hornos de vidrio flotado. Todos los hornos de flotado existentes en Alemania cuentan con calderas de recuperación.

Los costes de inversión pueden ser de más de 1 millón de euros con períodos de amortización variables según la eficacia y los precios energéticos. Las mejoras constantes en la eficacia energética primaria están erosionando la rentabilidad de las calderas de recuperación. En algunas aplicaciones puede que no exista un periodo de amortización atractivo, aunque esto varía según el caso. El proceso 3R puede ayudar a hacer que los sistemas de calderas de recuperación existentes sean más eficaces, y puede que mejore la rentabilidad de cualquier sistema nuevo propuesto para instalación. No obstante, si por cualquier motivo la instalación de una caldera de recuperación se considera inapropiada o poco atractiva económicamente,

la instalación del proceso 3R no cambiará necesariamente esta situación.

4.8.5. Precalentamiento de la Mezcla y del Casco de Vidrio [tm29 Infomil]

Descripción de la Técnica

La mezcla y el casco de vidrio se introducen normalmente fríos en el horno pero, utilizando el calor residual de los gases residuales para precalentar la mezcla y el casco de vidrio, pueden obtenerse considerables ahorros de energía. En el sector de lana de roca se utilizan predominantemente cubilotes, cuyo diseño precalienta intrínsecamente las materias primas.

Distintos precalentadores de mezcla/casco de vidrio han sido desarrollados e instalados por GEA/Interprojekt (precalentamiento directo), Zippe (precalentamiento indirecto) y Sorg (precalentamiento directo). Recientemente, Edmeston ha desarrollado una combinación de precalentador directo de casco de vidrio y precipitador electrostático. Los tres sistemas disponibles se describen a continuación.

Precalentamiento directo

Este tipo de precalentamiento supone el contacto directo entre el gas de combustión y la materia prima (casco de vidrio y mezcla) en un flujo a contracorriente. Los gases residuales se suministran al precalentador desde el conducto de gas residual situado tras el regenerador. Pasan a través de las cavidades del precalentador, donde entran en contacto directo con la materia prima. La temperatura de salida del casco de vidrio es de hasta 400 °C. El sistema incorpora una derivación que permite que el horno siga funcionando cuando el uso del precalentador es inapropiado o imposible. Hay precalentadores directos desarrollados e instalados por Interprojekt (anteriormente por GEA) y por Sorg.

Precalentamiento indirecto

El precalentamiento indirecto es en principio un intercambiador de calor de placa con flujo en contracorriente, en el que el material se calienta indirectamente. Esta diseñado en forma modular y consiste en bloques individuales de intercambio de calor situados uno encima del otro. Estos bloques están de nuevo divididos en gas residual horizontal y embudos de material verticales. En los embudos de material, el material fluye desde arriba abajo por gravedad. Según la productividad, el material alcanza una velocidad de 1 – 3 m/h y normalmente se calienta desde temperatura ambiente hasta unos 300 °C. Los gases de combustión se dejan en el fondo del precalentador y fluyen hasta la parte superior mediante embudos especiales con desviación. Los gases residuales fluyen horizontalmente por los módulos individuales. Normalmente, los gases de combustión se enfriarán unos 270°C – 300°C. El precalentador indirecto de casco de vidrio ha sido desarrollado por Zippe.

Filtro de lecho granulado electrificado de Edmeston

El sistema de lecho granulado electrificado (EGB) de Edmeston es un sistema híbrido entre un precipitador electrostático para la eliminación de polvo y un precalentador directo de casco de vidrio. El gas residual caliente entra por la parte superior del sistema y pasa a través de una etapa de ionización, que aplica carga eléctrica a las partículas de polvo. El gas pasa luego a un lecho de casco de vidrio granular, que es polarizado por un electrodo de alto voltaje. Las partículas de polvo cargadas son atraídas hacia el vidrio recuperado cuando se depositan. El casco de vidrio está en una columna y se agrega constantemente en la parte superior y se extrae de la parte inferior. El casco de vidrio precalentado (hasta 400 °C) y las partículas fijadas se cargan en el horno.

Eficacia Medioambiental

Estas técnicas tienen una serie de efectos medioambientales, que pueden variar de un caso a otro. En general, se han constatado las siguientes ventajas:

- ✓ Ahorros de energía entre el 10 y el 20 %.

- ✓ Reducción en las emisiones de NOx (debido al menor consumo de combustible y a las menores temperaturas del horno).
- ✓ En el caso del precalentamiento directo, se han registrado reducciones de los componentes ácidos, SO₂, HF, y HCl, del 60 %, 50 % y 90 % respectivamente (diferencia antes y después del lecho de casco de vidrio).

Consideraciones Económicas

La economía de los precalentadores de mezcla/casco de vidrio depende fuertemente de la capacidad del horno y del precalentador. Como ejemplo indicativo de costes, un precalentador indirecto para un horno de vidrio para envases de 370 toneladas/día supuso un coste de inversión (incluido PE) de 2,5 millones de euros. De este coste, 0,8 millones de euros fueron para el precalentador. Si pueden conseguirse ahorros energéticos significativos, puede conseguirse un periodo de amortización de 3 – 10 años. Este periodo puede ser inferior si se reduce significativamente el refuerzo eléctrico. En el momento actual, la mayoría de productores de vidrio para envases de la UE no consideran que el precalentamiento del casco de vidrio sea atractivo económicamente. No obstante, la posición puede variar de una región a otra y es objeto de estudio constante, al ir cambiado los precios de la energía y otros factores (como los límites de emisiones).

Aplicabilidad

Los sistemas de precalentamiento de casco de vidrio/mezcla pueden instalarse en teoría en cualquier horno de fusión de vidrio existente con un porcentaje de casco de vidrio en la mezcla superior al 50%. El precalentamiento sólo de la mezcla ha sido problemático y no se considera técnicamente probado. El uso de un precalentador directo causa mayores emisiones de partículas (hasta 2.000 mg/Nm³), lo que hace necesaria la eliminación secundaria de partículas. El polvo recogido puede normalmente reciclarse al horno.

Con el fin de mantener la pérdida de calor del sistema de transporte situado bajo el intercambiador de calor al mínimo posible, el precalentador debe estar situado lo más cerca posible del alojamiento del sistema de control. La posición ideal sería directamente encima del cargador de mezcla. Por motivos económicos, la temperatura del gas residual disponible debe ser de al menos 400 – 450 °C. Además, es necesario un enfriamiento de los gases de combustión de al menos 200 – 250 °C. Para evitar la aglomeración del material, la temperatura máxima de entrada de los gases de combustión no debe superar los 600 °C.

Consideraciones Asociadas

La técnica puede conseguir un aumento en la capacidad del horno de un 10 % - 15 % sin comprometer la vida del horno. Si no se aumenta el ritmo de producción, puede ser posible un pequeño aumento en la vida del horno. Al aplicar más calor en el horno, la técnica también puede reducir la necesidad de refuerzo eléctrico.

En algunos casos, se han producido problemas de producción de olores en el precalentador, debido a los vapores orgánicos liberados durante el presecado del vidrio recuperado. Los problemas son causados por la combustión de partículas de alimentos y otras materias orgánicas presentes en el casco de vidrio externo. Se están desarrollando soluciones a estos problemas (como la incineración).

El precalentamiento de materiales consume energía eléctrica, especialmente para el calentamiento directo que requiere un PE. Esto hace perder una parte del ahorro de energía, pero no es sustancial.

Existe la posibilidad de que el precalentamiento directo pueda producir emisiones de dioxinas, particularmente si se incluyen gases residuales de la aplicación de capas en caliente. No obstante, actualmente no hay evidencias que lo corroboren.

Instalaciones de ejemplo

(Todas de vidrio para envases)

❑ Precalentamiento directo:

- ✓ Cuatro hornos en Nienburger Glas, Nienburg, Alemania.
- ✓ Gerresheimer Glas, Dusseldorf, Alemania.
- ✓ Wiegand Glas, Stein am Wald, Alemania.
- ✓ Gerresheimer Glas, Budenheim, Alemania.

❑ Precalentamiento indirecto:

- ✓ PLM Glasindustrie Dongen BV, Dongen, Holanda.
- ✓ PLM Glass Division, Bad Münder, Alemania.
- ✓ Vetropack, St. Prex, Suiza – ya no está en funcionamiento.

❑ Filtro de Lecho Granulado Electrificado (EGB) de Edmeston:

- ✓ Irish Glass, Dublin, Irlanda.
- ✓ Leone Industries, New Jersey, EE.UU. (horno de oxicombustión).

CAPÍTULO 5. MEJORES TÉCNICAS DISPONIBLES

5.1. Introducción

Para la comprensión de este capítulo y de su contenido, se llama la atención del lector al prefacio de este documento, y en particular a su sección quinta: “Cómo entender y usar este documento”. Las técnicas y niveles de emisiones y consumos asociados, o los rangos de niveles, han sido evaluados a través de un proceso iterativo que comporta los pasos siguientes:

- Identificación de los aspectos medioambientales claves para el sector, en este caso las emisiones a la atmósfera de los hornos;
- Examen de las técnicas más relevantes para tratar estos aspectos clave;
- Identificación de los mejores niveles de comportamiento medioambiental, sobre la base de los datos disponibles en la Unión Europea y en todo el mundo.
- Examen de las condiciones en las que se consiguen estos niveles de comportamiento, como costes, efectos sobre otros medios o razones principales de la puesta en práctica de estas técnicas.
- Selección de las mejores técnicas disponibles (MTD) y de los niveles asociados de emisión y/o consumo para este sector en un sentido general, todo ello de acuerdo con el Artículo 2(11) y el Anexo IV de la Directiva.

La evaluación experta por parte de la Oficina Europea de IPPC y el Grupo Técnico de Trabajo (TWG: Technical Working Group) ha desempeñado un papel clave en cada uno de estos pasos y el modo en que aquí se presenta la información.

Sobre la base de estas técnicas de evaluación, y en la medida de lo posible, en este capítulo se presentan niveles de emisiones y consumos, asociados con el uso de las mejores técnicas disponibles, que se consideran apropiados para el sector en su conjunto y en muchos casos reflejan el funcionamiento real de algunas instalaciones del sector. Cuando se presentan niveles de emisiones o consumos “asociados con las mejores técnicas disponibles”, debe entenderse que ello significa que tales niveles representan el comportamiento medioambiental que podría preverse como resultado de la aplicación, en este sector, de las técnicas descritas, teniendo en cuenta el equilibrio de costes y ventajas inherente a la definición de las MTD. No obstante, no son valores límite de consumo o emisión ni deben entenderse como tales. En algunos casos puede ser técnicamente posible conseguir mejores niveles de emisiones o consumos, pero debido a los costes involucrados o por la consideración de efectos sobre otros medios, no se consideran apropiados como mejor técnica disponible para el sector en su conjunto. No obstante, tales niveles pueden ser considerados justificados en casos más específicos en los que existan motivos especiales de puesta en práctica.

Los niveles de emisiones y consumos asociados con el uso de las mejores técnicas disponibles deben ser contemplados en el contexto de las condiciones de referencia que se especifiquen (Ej. períodos de promedio).

El concepto de “niveles asociados con las MTD” arriba descrito debe distinguirse del término “nivel obtenible” utilizado en otros lugares de este documento. Cuando un nivel se describe como “obtenible” usando una técnica particular o una combinación de técnicas, debe entenderse que significa que se puede esperar conseguir el nivel a lo largo de un periodo de tiempo sustancial en una instalación o proceso bien mantenido y gestionado mediante tales técnicas.

Cuando se hallan disponibles, se facilitan datos relativos a costes junto con las técnicas presentadas en el capítulo anterior. Estos dan una indicación aproximada de la magnitud de los costes involucrados. No obstante, el coste real de la aplicación de una técnica dependerá mucho de la situación específica relativa, por ejemplo, a los impuestos, tasas y características técnicas de la instalación en cuestión. No es posi-

ble evaluar con detalle estos factores específicos de cada centro de producción. En ausencia de datos relativos a costes, las conclusiones sobre la viabilidad económica de las técnicas se extraen a partir de observaciones de las instalaciones existentes.

La intención es que las mejores técnicas disponibles generales de este capítulo sean un punto de referencia en relación al cual se juzgue el comportamiento presente de una instalación o se estudie una propuesta de una nueva instalación. De este modo servirán de ayuda en la determinación de las condiciones apropiadas “basadas en las mejores técnicas disponibles” para la instalación, o en el establecimiento de reglamentos de aplicación general conforme al Artículo 9(8). Esta previsto que las nuevas instalaciones puedan diseñarse para tener un comportamiento igual o incluso mejor que los niveles generales para las mejores técnicas disponibles aquí presentados. También se considera que las instalaciones existentes podrían moverse hacia los niveles generales para las mejores técnicas disponibles o incluso mejorarlos, con arreglo a la aplicabilidad técnica y económica de las técnicas en cada caso.

Aunque los BREF no establecen normas de cumplimiento legal, tienen por finalidad facilitar información que sirva de referencia a la industria, los Estados Miembros y el público acerca de los niveles obtenibles de emisiones y consumos al utilizar las técnicas especificadas. Los valores límite apropiados para cualquier caso específico deberán determinarse teniendo en cuenta los objetivos de la Directiva IPPC y las consideraciones locales.

Este capítulo discute las mejores técnicas disponibles, para las emisiones de cada uno de los sectores de la Industria del Vidrio por separado, en las secciones 5.3. a 5.10. En la mayoría de los sectores se limitan a emisiones a la atmósfera, dado que se consideran una prioridad en la Industria del Vidrio. Dentro de cada una de las secciones específicas de los sectores, se discuten las emisiones por separado para cada sustancia en la fusión, y luego de forma más general para las actividades de acabado. Las emisiones acuosas son en la mayoría de casos relativamente bajas y no son específicas de la Industria del Vidrio. Las consideraciones generales de las emisiones acuosas y otros residuos se discuten en la Secciones 5.11 y 5.12.

5.2. Generalidades

Una característica importante de muchas instalaciones en la Industria del Vidrio es la reconstrucción periódica de los hornos. Hay dos categorías principales de reconstrucción, la reconstrucción normal y la reconstrucción completa, que se describen en la Sección 4.1. Para una serie de técnicas discutidas en el Capítulo 4 puede ser técnicamente beneficioso y más rentable retrasar la aplicación hasta una reconstrucción. Para algunas técnicas, su aplicación puede sólo ser posible en una reconstrucción (normal o completa), pero para otras técnicas un retraso de este tipo puede ofrecer pocas ventajas. Estos aspectos se discuten más en la Sección 4.1 y en las consideraciones específicas de las técnicas descritas en el Capítulo 4.

Otro factor importante en la decisión de lo que es apropiado en una instalación particular, es la edad del horno. El plan de acción apropiado para un horno que se espera que funcione durante un periodo de 8 a 12 años puede ser muy distinto que para un horno que deba ser remodelado en 1 ó 2 años. Esto puede afectar el equilibrio entre, por ejemplo, una técnica que requiera un cambio importante de tecnología (por ejemplo, oxicombustión) que sólo pueda realizarse en una reconstrucción, y una técnica secundaria que pueda incorporarse en una planta existente.

Para determinados parámetros, y en particular para NOx en algunos sectores, el potencial de las técnicas primarias no ha sido totalmente desarrollado. En la Directiva 96/61/CE se da preferencia a medidas que evitan la contaminación, y si estas técnicas primarias se siguen desarrollando pueden representar más apropiadamente la MTD que algunas de las técnicas secundarias descritas en este Capítulo. En muchos casos en la Industria del Vidrio, la aplicación de la gama completa de técnicas descritas en este capítulo representa una inversión muy sustancial; y los costes asociados serían insostenibles a menos que se distribuyan a lo largo de un periodo de tiempo razonable.

A menos que se indique lo contrario, las condiciones de referencia para las cifras presentadas en este capítulo son:

- Para gases de combustión: secos, temperatura 0°C (273K), presión 101,3 kPa, 8 % oxígeno en volumen (hornos de fusión continuos), 13 % oxígeno en volumen (hornos de fusión discontinuos). Para sistemas de oxicombustión, la expresión de las emisiones corregidas al 8% de oxígeno es de escaso valor, y las emisiones de estos sistemas deben discutirse en términos de masa.
- Para otros gases (incluidas las emisiones de los hornos de polimerización y secado sin incineración del gas de escape): temperatura 0 °C (273K), presión 101,3 kPa sin corrección de concentración de oxígeno o de vapor de agua.

Las cifras de niveles de emisiones indicadas en este capítulo se basan en cifras medias, no en valores máximos instantáneos, que podrían ser mayores. Los niveles de emisiones indicados se basan en un periodo de promedio típico no inferior a 30 minutos ni superior a 24 horas.

Factores de Conversión

Los niveles de emisiones asociados con las MTD se presentan como rangos de concentración de emisiones (mg/Nm^3) y de masa emitida ($\text{kg}/\text{tonelada de vidrio fundido}$). Este doble enfoque permite la comparación entre las técnicas de los hornos y proporciona una indicación del impacto relativo de las emisiones atmosféricas sobre el medio ambiente. Para las emisiones de hornos de combustibles fósiles, la relación entre la concentración de las emisiones y la masa emitida por tonelada de vidrio fundido depende predominantemente del consumo específico de energía para la fusión:

$$\text{Masa emitida [kg/tonelada de vidrio]} = \text{factor de conversión} \times \text{concentración emisiones [mg/Nm}^3\text{]}$$

donde: factor de conversión = $(Q/P) \times 10^{-6}$

y Q = volumen de gas residual en Nm^3/h

P = ritmo de producción en toneladas de vidrio/h

El volumen de gas residual depende principalmente del consumo de energía, tipo de combustible, y del comburente (aire u O_2). El consumo de energía es una función compleja de (predominantemente) el tipo de horno, el tipo de vidrio y el porcentaje de vidrio recuperado.

No obstante, hay una serie de factores que pueden influir sobre la relación entre concentración y el flujo de masa específico, como:

- ✓ el tipo de horno (temperatura de precalentamiento del aire, técnica de fusión)
- ✓ el tipo de vidrio producido (consumo de energía para fusión)
- ✓ la mezcla de energías (combustibles fósiles / refuerzo eléctrico)
- ✓ el tipo de combustible fósil (fuel-oil, gas)
- ✓ el tipo de comburente (oxígeno, aire, aire enriquecido con oxígeno)
- ✓ el porcentaje de vidrio recuperado
- ✓ la composición de la mezcla
- ✓ la edad del horno
- ✓ el tamaño del horno

Así pues, no hay una forma directa de definir factores de conversión globales. Por consiguiente, en este Capítulo, las concentraciones de las emisiones (mg/Nm^3) se indican como la base principal de los niveles de emisiones asociados con las MTD. Para hallar los rangos de masa emitida ($\text{kg}/\text{tonelada de vidrio fundido}$) que “generalmente equivalen” a estas concentraciones de emisiones, se han desarrollado una serie de factores de conversión correspondientes a hornos de aire-combustible nuevos y eficaces desde el punto de vista energético. Con ello se da por supuesto un consumo optimizado de energía y, de este modo, se tiene en cuenta el consumo de energía en la consideración de las MTD. Estos factores de conversión se indican en la tabla siguiente.

En muchos casos pueden observarse consumos energéticos más elevados, pero en estos casos las eficacias deberían compararse con los niveles de emisiones asociados con las MTD expresados como concentraciones.

En algunos casos (hornos eléctricos, oxicombustión), es necesario evaluar el comportamiento únicamente en términos de emisiones específicas de masa ($\text{kg}/\text{tonelada de vidrio fundido}$).

		Factores indicativos para convertir mg/Nm^3 a $\text{kg}/\text{tonelada de vidrio fundido}$
Vidrio plano		$2,5 \times 10^{-3}$
Vidrio para envases	Caso general	$1,5 \times 10^{-3}$
	Casos específicos⁽²⁾	$3,0 \times 10^{-3}$
Fibra de vidrio de filamentos continuos		$4,5 \times 10^{-3}$
Vidrio doméstico	Sodocálcico	$2,5 \times 10^{-3}$
	Casos específicos⁽³⁾	Según el caso (frecuentemente $3,0 \times 10^{-3}$)
Lana mineral		2×10^{-3}
Cubilotes de lana de roca		$2,5 \times 10^{-3}$
Vidrio especial, Vidrio para TV, Panel		3×10^{-3}
Vidrio especial, Vidrio para TV, Embudo		$2,5 \times 10^{-3}$
Vidrio de borosilicato (tubo)		4×10^{-3}
Cerámica de vidrio		$6,5 \times 10^{-3}$
Vidrio soluble		$1,5 \times 10^{-3}$
Vidrio para iluminación (sodocálcico)		$2,5 \times 10^{-3}$

Tabla 5.1: Factores de conversión indicativos de mg/Nm^3 a $\text{kg}/\text{tonelada de vidrio fundido}$ ⁽¹⁾

1. Esta tabla se refiere sólo a hornos con combustión de aire-combustible.

2. Los casos específicos corresponden a casos menos favorables (hornos pequeños con una productividad generalmente por debajo del 30%). Esta categoría representa sólo un 1 o 2% de la producción de envases.

3. Los casos específicos corresponden a casos menos favorables o vidrios que no son sodocálcicos: vidrios de borosilicato, vitrocerámica, vidrio de cristal y con poca frecuencia a vidrio al plomo.

5.2.1. Almacenamiento y Manipulación de Materias primas

Pueden utilizarse las técnicas descritas en el Capítulo 4 para el almacenamiento y manipulación de materias primas, en una combinación apropiada para una instalación particular, para asegurar que las emisiones de estas actividades sean insignificantes. Si existen problemas en una instalación particular, la correcta aplicación de estas técnicas puede proporcionar normalmente una solución.

5.2.2. Partículas

En general, la MTD para el control de las emisiones de polvo de los hornos en la Industria del Vidrio se considera el uso de un precipitador o sistemas de filtro de mangas, funcionando cuando sea apropiado en conjunción con un sistema de lavado de gases ácidos seco o semiseco. La eficacia asociada con estas técnicas se discute en el Capítulo 4.

Algunos representantes de la Industria del Vidrio en el Grupo de Trabajo Técnico han señalado que, en su opinión, los beneficios medioambientales de las técnicas secundarias en comparación con las técnicas primarias pueden no justificar en todos los casos los mayores costes que implican en la producción de

vidrio sodocálcico. Este parecer es especialmente relevante para hornos de vidrio sodocálcico de pequeña capacidad que ya consigan niveles relativamente bajos de polvo y de metales.

Pudiera ser que la rentabilidad de las medidas primarias (costes por kg de polvo reducido) fuera mejor que para las técnicas de eliminación secundarias. No obstante, en general, se considera que globalmente, en relación con la definición de “mejor” en la Directiva IPPC, que significa “más eficaz en conseguir un alto nivel general de protección del medio ambiente en su conjunto”, se apoya la selección de técnicas secundarias como MTD. Los factores determinantes son la mayor eficacia medioambiental de las técnicas de eliminación secundaria con respecto a las emisiones de polvo, metales, partículas finas y emisiones gaseosas, y el amplio uso de estas técnicas en condiciones económicas normales en hornos de todos los tipos y capacidades.

Además, generalmente se considera que la economía de escala no desempeña el papel decisivo en la determinación de la MTD ni siquiera para los hornos más pequeños cubiertos por la Directiva IPPC.

Los pros y los contras de las técnicas primarias y secundarias se discuten en la Sección 4.4.1.7. No obstante, en este capítulo se considera que, en conjunto, la eliminación secundaria de polvo representa la MTD para la mayoría de hornos, a menos que puedan conseguirse emisiones equivalentes con medidas primarias.

5.2.3. Óxidos de Azufre

En la mayoría de formulaciones de vidrio, los niveles de sulfatos en la mezcla ya están minimizados de forma compatible con la formulación del vidrio y los requisitos de calidad del producto. Se cree que, en la mayoría de los casos, la MTD para las emisiones de polvo comportará el uso de un sistema de eliminación de polvo, que con frecuencia incluirá lavado de gases ácidos. El residuo sulfatado producido puede en general reciclarse con las materias primas del horno para evitar la producción de un residuo sólido. Cuando procede, esto se tiene en cuenta en la propuesta de niveles de emisiones asociados con las MTD. Los principales factores que afectan las emisiones de SO_x son por lo tanto la elección de combustible, el tipo de vidrio y las consideraciones de reciclaje del polvo eliminado. El sistema de lavado puede también optimizarse para reducir otros gases ácidos, y las cifras discutidas en las siguientes secciones se basan generalmente en el uso de un sistema de este tipo.

Si los niveles de sulfato en la mezcla son muy bajos (o incluso cero) y se utiliza gas natural como combustible, el sistema de lavado de gases ácidos puede no ser necesario. No obstante, en estas circunstancias las emisiones de SO_x serán generalmente menores que las cifras para mezclas que contienen sulfatos con lavado de gases ácidos.

La elección entre gas y fuel-oil depende mucho de las condiciones económicas del momento, y se considera fuera del ámbito de este documento especificar cuál de estos combustibles representa la MTD. En los lugares en los que haya suministro de gas natural accesible y lo permitan las condiciones económicas, el uso de gas natural producirá normalmente menores emisiones de SO_x. Si se utiliza fuel-oil, un contenido máximo de azufre del 1% se considera como MTD. No obstante, un mayor contenido de azufre puede también ser aceptable si se combina con un sistema de lavado que consiga un nivel de emisión equivalente, y si se identifica una vía de desecho apropiada para el material recogido. Se sabe que en algunos Estados Miembros existen factores económicos que dificultan el uso de fuel-oil bajo en azufre.

5.2.4. Otras Sustancias

A efectos de este documento, las clasificaciones de la tabla inferior son aplicables a metales y compuestos metálicos. Los metales que caen fuera de estos grupos se especifican individualmente debido a su alta toxicidad, o se cubren sólo dentro de la categoría de polvo debido a que su baja toxicidad, generalmente, no justifica su consideración específica.

Cuando se indican niveles de metales en este documento, los mismos incluyen los metales presentes en la fase gaseosa y los ligados al polvo (ver 4.4.1.7).

Metales del Grupo 1 y sus compuestos	Metales del Grupo 2 y sus compuestos
Arsénico	Antimonio
Cobalto	Plomo
Níquel	Cromo III
Selenio	Cobre
Cromo VI	Manganoso
	Vanadio
	Estaño

Tabla 5.2: Clasificaciones de metales y sus compuestos

5.3. Vidrio para Envases

5.3.1. Polvo

En general, en este sector, la MTD para polvo se considera que es el uso de un precipitador electrostático o filtro de mangas que opere, si es apropiado, en conjunción con un sistema de lavado de gases ácidos seco o semiseco. El nivel de emisiones de MTD asociado con estas técnicas es de 5 - 30 mg/Nm³, que generalmente equivale a menos de 0,1 kg/tonelada de vidrio fundido. Los valores situados en la parte inferior del rango indicado son generalmente los que cabe esperar para sistemas de filtro de mangas. En algunos casos, la aplicación de las MTD para emisiones de metales puede producir menores niveles de emisiones de polvo.

5.3.2. Óxidos de Nitrógeno

El Sector de Vidrio para Envases utiliza una amplia gama de tipos y tamaños de hornos, y hay muchas técnicas primarias y secundarias disponibles que consiguen buenas eficacias de reducción de NOx. Hay también una serie de técnicas que pueden conseguir niveles de NOx muy bajos, pero que pueden ser sólo aplicables en ciertas circunstancias. Estas se discuten en el Capítulo 4, por ejemplo, el horno de fusión Sorg LoNOx (bajo en NOx), el horno de fusión Flex melter, o la fusión eléctrica. También hay técnicas aplicables más ampliamente pero que pueden no representar la opción más apropiada en todas las circunstancias, como por ejemplo la oxicombustión y el precalentamiento de la mezcla/casco de vidrio.

La selección de técnicas que representa las MTD dependerá mucho de aspectos específicos del centro de producción. Las técnicas principales (o combinación de las mismas) que pueden representar las MTD en este sector son medidas primarias (modificaciones de combustión), 3R/Recombustión (para hornos regenerativos), oxicombustión, SNCR o SCR. Se considera que el nivel de emisiones para óxidos de nitrógeno (expresados como NO₂) asociados con las técnicas que constituyen generalmente MTD es de 500 - 700 mg/Nm³, que generalmente equivale a 0,5 – 1,1 kg/tonelada vidrio fundido. Las cifras más bajas de este rango hacen referencia generalmente a eliminación secundaria o fusión con oxicombustión. No obstante, si otras técnicas pueden conseguir valores comprendidos en este rango y son técnica y económicamente viables, también representan MTD.

En caso de que las técnicas más apropiadas para una situación dada requieran un retraso hasta la siguiente reconstrucción (Ej. oxicombustión o modificación de la geometría del horno), dichos niveles pueden no ser alcanzables hasta después de la reconstrucción. Sólo con el uso de medidas primarias, cabe esperar niveles de emisiones de 600 - 850 mg/Nm³, que generalmente equivalen a 0,9 – 1,3 kg/tonelada de vidrio fundido, para muchos hornos con combustión de aire-combustible.

Para aquellos procesos que requieren un uso sustancial de compuestos con nitratos en la mezcla, los niveles de emisiones arriba indicados pueden ser difíciles de alcanzar sin eliminación secundaria. Si el uso de nitratos es muy frecuente o permanente, o si se producen emisiones muy altas, pueden ser necesarias

técnicas secundarias. En este sector, sólo los productos especiales (como algunos frascos de perfumes) estarían en esta categoría, lo que representa menos del 1% de producción. Excepto en circunstancias muy excepcionales, el nivel de emisión asociado con las MTD debería ser inferior a 1000 mg/Nm³, que generalmente equivale a 3,0 kg/tonelada de vidrio fundido. Si el uso de nitratos es infrecuente, los costes de medidas secundarias (si no fueran necesarias de otro modo) puede no estar justificado. Cuando sea practicable, el primer paso debería ser minimizar el uso de nitratos en la mezcla, antes de considerar medidas de eliminación secundarias.

5.3.3. Óxidos de Azufre

Para los niveles de emisiones indicados a continuación se supone el uso de eliminación secundaria de polvo, con lavado de gases ácidos seco o semiseco cuando proceda. Por consiguiente, en general en este sector, los niveles de emisiones asociados con las MTD para óxidos de azufre (expresados como SO₂) se considera que son:

- Para combustión a gas natural, 200 - 500 mg/Nm³, que generalmente equivale a 0,3 – 0,75 kg/tonelada de vidrio fundido.
- Para combustión a fuel-oil, 500 – 1.200 mg/Nm³, que generalmente equivale a 0,75 – 1,8 kg/tonelada de vidrio fundido.

Estos valores corresponden a situaciones en las que la prioridad es reducir las emisiones de SOx y que permiten el pleno reciclaje del polvo en muchos casos. No obstante, cuando desde un enfoque medioambiental integral se considera una alta prioridad la minimización de residuos de polvo de filtro y el reciclaje de vidrio recuperado, y una evaluación del balance de masa indica la imposibilidad de obtener estos valores, los siguientes niveles de emisiones pueden representar los niveles asociados con las MTD:

- Para combustión a gas natural, hasta 800 mg/Nm³, que generalmente equivale a 1,2 kg/tonelada de vidrio fundido.
- Para combustión a fuel-oil, hasta 1.500 mg/Nm³ que generalmente equivale a 2,25 kg/tonelada de vidrio fundido.

Estos aspectos se discuten en las secciones 4.4.3.3 y 5.2.3, y en el anexo sobre balance de azufre.

5.3.4. Otras Emisiones de la Fusión

En general, en este sector, la MTD se considera que es la selección de materias primas para minimizar las emisiones, en combinación con lavado de gases ácidos, cuando procede. El lavado de gases ácidos puede no ser siempre necesario para proteger el equipo de eliminación o para alcanzar las cifras arriba indicadas para SOx. En tal caso, el lavado de gases ácidos se considera que constituye MTD si no pueden alcanzarse los niveles abajo indicados con medidas primarias. Los niveles de emisiones asociados con las MTD para los contaminantes abajo indicados se considera que son:

✓ Cloruros (expresados como HCl)	<30 mg/Nm ³
✓ Fluoruros (expresados como HF)	<5 mg/Nm ³
✓ Metales (Grupo 1 + 2)	<5 mg/Nm ³
✓ Metales (Grupo 1)	<1 mg/Nm ³

Las clasificaciones de los metales y sus compuestos se indican en la Tabla 5.2.

5.3.5. Procesos de Acabado

La principal fuente de emisiones de los procesos de acabado es el tratamiento de aplicación de capas en caliente. Para tratar las emisiones pueden utilizarse una serie de técnicas descritas en el Capítulo 4, y las técnicas escogidas dependerán de aspectos específicos de la instalación. Los niveles de emisiones asociados con las MTD para los contaminantes abajo especificados se considera que son:

✓ Cloruros (expresados como HCl)	<30 mg/Nm ³
✓ Partículas	<20 mg/Nm ³
✓ Estaño	<5 mg/Nm ³
✓ Estaño orgánico	<1 mg/Nm ³

Los vapores del tratamiento en caliente pueden también tratarse con los gases residuales del horno en un sistema de eliminación común de gases ácidos y polvo.

5.4. Vidrio Plano

5.4.1. Polvo

En general, en este sector, la MTD para polvo se considera que es el uso de un precipitador electrostático o filtro de mangas que opere, si es apropiado, en conjunción con un sistema de lavado de gases ácidos seco o semiseco. El nivel de emisiones asociado con estas técnicas es de 5 - 30 mg/Nm³, que normalmente equivale a menos de 0,1 kg/tonelada de vidrio fundido. Los valores en la parte inferior del rango indicado son los que generalmente cabría esperar para sistemas de filtro de mangas. En algunos casos, la aplicación de las MTD para emisiones de metales puede producir menores niveles de emisiones para polvo.

5.4.2. Óxidos de Nitrógeno

En general, en este sector, el nivel de emisiones asociado con las MTD para óxidos de nitrógeno (expresado como NO₂) se considera que es de 500 - 700 mg/Nm³, que generalmente equivale a 1,25 – 1,75 kg/tonelada de vidrio fundido. Este nivel se basa principalmente en el uso de técnicas primarias o 3R/Recombustión en combinación con técnicas primarias. No obstante, cuando procede pueden también usarse otras técnicas (como SCR o SNCR) para alcanzar estos niveles, y puede considerarse también como MTD. Cuando se utilicen técnicas de 3R/Recombustión o SCR, cabe esperar valores de emisiones situados hacia la parte inferior de la gama.

Cuando las técnicas más apropiadas para una situación dada requieran esperar hasta la nueva reconstrucción (Ej. oxícombustión o modificación de la geometría del horno), tales niveles pueden no ser alcanzables hasta después de la reconstrucción. Sólo con el uso de modificaciones de la combustión cabe esperar niveles de emisiones inferiores a 850 mg/Nm³, que normalmente equivalen a menos de 2,2 kg/tonelada de vidrio fundido para muchos hornos con combustión de aire-combustible. La técnica 3R puede normalmente aplicarse durante la campaña de un horno.

Para aquellos procesos que requieran un uso sustancial de compuestos con nitratos en la mezcla, los niveles de emisiones arriba indicados pueden ser difíciles de alcanzar sin eliminación secundaria. Si el uso de nitratos es muy frecuente, o si se producen emisiones muy altas, pueden ser necesarias técnicas secundarias. En tales aplicaciones, el nivel de emisión asociado con las MTD debería ser inferior a 850 mg/Nm³, que generalmente equivale a menos de 2,2 kg/tonelada de vidrio fundido. Si el uso de nitratos es infrecuente, los costes de medidas secundarias (si no fueran necesarias de otro modo) puede no estar justificado. Cuando sea practicable, el primer paso debería ser minimizar el uso de nitratos en la mezcla, antes de considerar medidas de eliminación secundarias

5.4.3. Óxidos de Azufre

Para los niveles de emisiones abajo indicados se supone el uso de eliminación secundaria para polvo, con lavado de gases ácidos seco o semiseco cuando proceda. Por consiguiente, en este sector, los niveles de emisiones asociados con las MTD para óxidos de azufre (expresados como SO₂) se considera que son:

- Para combustión a gas natural, 200 - 500 mg/Nm³, que generalmente equivale a 0,5 - 1,25 kg/tonelada de vidrio fundido.
- Para combustión a fuel-oil, 500 – 1.200 mg/Nm³, que generalmente equivale a 1,25 - 3 kg/tonelada de vidrio fundido.

Estos valores corresponden a situaciones en las que la prioridad es reducir las emisiones de SOx y que permiten el pleno reciclaje del polvo en muchos casos. No obstante, cuando desde un enfoque medioambiental integral se considera una alta prioridad la minimización de residuos de polvo de filtro y el reciclaje de vidrio recuperado, y una evaluación del balance de masa indica la imposibilidad de obtener estos valores, los siguientes niveles de emisiones pueden representar los niveles asociados con las MTD:

- Para combustión a gas natural, hasta 800 mg/Nm³, que generalmente equivale a 2 kg/tonelada de vidrio fundido.
- Para combustión a fuel-oil, hasta 1500 mg/Nm³ que generalmente equivale a 3,75 kg/tonelada de vidrio fundido.

Estos aspectos se discuten en las secciones 4.4.3.3 y 5.2.3, y en el anexo sobre balance de azufre.

5.4.4. Otras Emisiones de la Fusión

En general, en este sector, la MTD se considera que es la selección de materias primas para minimizar las emisiones, en combinación con lavado de gases ácidos más eliminación de polvo. Por consiguiente, los niveles de emisiones asociados con las MTD para los contaminantes abajo indicados se considera que son:

✓ Cloruros (expresados como HCl)	<30 mg/Nm ³
✓ Fluoruros (expresados como HF)	<5 mg/Nm ³
✓ Metales (Grupo 1 + 2)	<5 mg/Nm ³
✓ Metales (Grupo 1)	<1 mg/Nm ³

Las clasificaciones de los metales y sus compuestos se indican en la Tabla 5.2.

5.4.5. Procesos de Acabado

Para tratar las emisiones de los procesos de acabado pueden utilizarse una serie de técnicas descritas en el Capítulo 4, y las técnicas escogidas dependerán de aspectos específicos de la instalación. Los niveles de emisiones asociados con las MTD para los contaminantes abajo especificados se considera que son:

✓ Cloruros (expresados como HCl)	<30 mg/Nm ³
✓ Fluoruros (expresados como HF)	<5 mg/Nm ³
✓ Partículas	<20 mg/Nm ³

✓ Metales (Grupo 1 + 2)	<5 mg/Nm ³
✓ Metales (Grupo 1)	<1 mg/Nm ³

Las clasificaciones de los metales y sus compuestos se indican en la Tabla 5.2.

5.5. Fibra de Vidrio de Filamentos Continuos

5.5.1. Polvo

En general, en este sector, la MTD para polvo se considera que es el uso de un precipitador electrostático o filtro de mangas que opere, si es apropiado, en conjunción con un sistema de lavado de gases ácidos seco o semiseco. El nivel de emisiones asociado con estas técnicas es de 5 - 30 mg/Nm³, que normalmente equivale a menos de 0,14 kg/tonelada de vidrio fundido. Los valores en la parte inferior del rango indicado son los que generalmente cabría esperar para sistemas de filtro de mangas. En algunos casos, la aplicación de las MTD para emisiones de metales puede producir menores niveles de emisiones para polvo.

En este sector, la naturaleza del polvo significa que el enfriamiento del gas residual y la posición del sistema de eliminación son muy importantes para optimizar la eficacia de la eliminación. En algunos casos, puede haber ya instalado equipo de eliminación que cumpla los requisitos de MTD en su diseño general pero que pueda haber sido instalado para cumplir un objetivo menos exigente y por lo tanto no esté idealmente posicionado. Si el equipo existente es capaz de alcanzar niveles de emisiones de 50 mg/Nm³ en lugar de 30 mg/Nm³ como se describe arriba, los costes de sustitución o modificaciones importantes antes de la próxima reconstrucción podrían ser desproporcionados en relación con las ventajas obtenidas.

Determinadas formulaciones avanzadas pueden producir niveles de emisiones que se acerquen a los arriba indicados sin eliminación secundaria. En tal caso, deberá hacerse una evaluación específica para el centro en relación con las MTD.

5.5.2. Óxidos de Nitrógeno

En el momento presente, este sector atraviesa un periodo de transición en el control de NOx, que hace difícil extraer conclusiones firmes en relación con las MTD. Los niveles de emisiones son generalmente superiores a 1000 mg/Nm³ y mayores de 4.5 kg/tonelada de vidrio fundido. Se ha realizado una cierta cantidad de trabajo con modificaciones de la combustión, y se han obtenido algunos buenos resultados. No obstante, debido a determinados aspectos específicos del sector, como su elevado consumo energético, no está previsto que para la mayoría de procesos puedan obtenerse niveles de emisión muy por debajo de 800 mg/Nm³, que normalmente equivale a 3,6 kg/tonelada de vidrio fundido, sólo con modificaciones de la combustión convencional.

No hay ejemplos conocidos de SNCR o SCR en este sector. Se considera que la SCR es poco probable que pueda aplicarse en un futuro próximo debido a problemas con la condensación de boratos en el catalizador. No parece haber obstáculos técnicos sustanciales para el uso de SNCR en este sector y, si se instala la técnica, cabe esperar que produzca reducciones del 40 - 70 %, según la aplicación precisa.

Actualmente hay 6 hornos de fusión con oxicombustión en Europa (de un total de 26), y varios otros ejemplos en otras partes del mundo. El número de hornos de oxicombustión va en aumento y no hay obstáculos técnicos insalvables para su aplicación. No obstante, hay todavía una cierta incertidumbre sobre las implicaciones económicas de la técnica, así como preocupación sobre su efecto sobre la vida de los refractarios. La técnica se utiliza más ampliamente en otros sectores y cada vez tienen una aceptación más general. Cuando se aplica en este sector, cabe esperar que la técnica permita alcanzar 0,5 – 1,25 kg/tonelada de vidrio fundido.

En general, en este sector, la MTD para óxidos de nitrógeno (expresados como NO₂) se considera que es la fusión con oxicombustión, y el nivel de emisiones asociado con la MTD se considera que es de 0,5 – 1,5 kg/tonelada de vidrio fundido. Esta afirmación no es una conclusión firme, sino un juicio equilibrado sobre la base de la información disponible en el momento presente. Se reconoce que la técnica todavía comporta un elemento de riesgo económico, pero se espera que la técnica sea aceptada más ampliamente como MTD a medio plazo. Muchos productores programan la técnica para reconstrucciones, y para la mayoría de aplicaciones en este sector no hay actualmente otra técnica capaz de producir los mismos niveles de emisiones con costes comparables. Cuando haya otras técnicas que sean practicables, un nivel de emisiones de MTD comparables se considera que es de 500 - 700 mg/Nm³.

5.5.3. Óxidos de Azufre

Para los niveles de emisiones indicados a continuación se supone el uso de eliminación secundaria de polvo, con lavado de gases ácidos seco o semiseco cuando proceda. Por consiguiente, en general en este sector, los niveles de emisiones asociados con las MTD para óxidos de azufre (expresados como SO₂) se considera que son:

- ❑ Para combustión a gas natural, menos de 200 mg/Nm³, que normalmente equivale a menos de 0,9 kg/tonelada de vidrio fundido. Cuando se utilizan sulfatos como agentes de afino, esta concentración podría ser de hasta 800 mg/Nm³, que normalmente equivale a menos de 3,6 kg/tonelada de vidrio fundido.
- ❑ Para combustión a fuel-oil, 500 – 1.000 mg/Nm³, que normalmente equivale a 2,25 – 4,5 kg/tonelada de vidrio fundido.

Las cifras de las partes altas de estos rangos corresponden a instalaciones en las que el polvo recogido se recicla al horno. Si no se recicla el polvo, cabe esperar que las emisiones sean inferiores a los máximos indicados.

5.5.4. Otras Emisiones de la Fusión

En general, en este sector, la MTD se considera que son las medidas primarias o el lavado de gases ácidos en combinación con la eliminación de polvo. Los niveles de emisiones asociados con las MTD para los contaminantes abajo indicados se considera que son:

✓ Cloruros (expresados como HCl)	<30 mg/Nm ³
✓ Fluoruros (expresados como HF)	5 - 15 mg/Nm ³
✓ Metales (Grupo 1 + 2)	<5 mg/Nm ³
✓ Metales (Grupo 1)	<1 mg/Nm ³

Las clasificaciones de los metales y sus compuestos se indican en la Tabla 5.2.

Algunas formulaciones bajas en fluoruros o sin fluoruros pueden, sin eliminación secundaria, producir niveles de emisiones de HF que se acerquen, aunque no necesariamente alcancen los arriba indicados. En tal caso, debe hacerse una evaluación específica para el centro de producción en relación con la MTD.

5.5.5. Procesos de Acabado

Las emisiones asociadas con los procesos de acabado pueden ser muy variables, y pueden usarse una amplia gama de técnicas primarias y secundarias. Los niveles de emisiones asociados con las MTD se considera que son de 5 - 20 mg/Nm³ para partículas, y de 5 - 50 mg/Nm³ para compuestos orgánicos volátiles.

5.6. Vidrio Doméstico

En general, y cuando es económicamente viable, la fusión predominantemente eléctrica se considera MTD para la producción de vidrio al plomo, vidrio de cristal y vidrio opalino, dado que esta técnica permite un control eficaz de las posibles emisiones de elementos volátiles. Si se produce vidrio de cristal con una formulación menos volátil, pueden considerarse otras técnicas al determinar las MTD para una instalación particular.

5.6.1. Polvo

En general, en este sector, la MTD para polvo se considera que es el uso de un precipitador electrostático o filtro de mangas que opere, si es apropiado, en conjunción con un sistema de lavado de gases ácidos seco o semiseco. El nivel de emisiones asociado con estas técnicas es de 5 - 30 mg/Nm³, que normalmente equivale a menos de 0,1 kg/tonelada de vidrio fundido. Los valores en la parte inferior del rango indicado son los que generalmente cabría esperar para sistemas de filtro de mangas. En algunos casos, la aplicación de las MTD para emisiones de metales puede producir menores niveles de emisiones para polvo.

Para las formulaciones de sodio-calcio, debe hacerse referencia a la Sección 5.2.2 anterior y a la Sección 4.4.1.7. Estos aspectos son particularmente relevantes para este sector debido a su naturaleza específica, que se detalla en la Sección 5.6.2 siguiente.

5.6.2. Óxidos de Nitrógeno

En el momento presente hay relativamente poca información disponible en relación con la eliminación de NOx en este sector, lo que hace difícil extraer conclusiones firmes en relación con las MTD. Las emisiones de NOx para hornos de aire-combustible son generalmente del orden de 1500 - 2000 mg/Nm³, que generalmente equivalen a 3,75 - 5 kg/tonelada de vidrio fundido.

La naturaleza del sector da lugar a una serie de aspectos que pueden afectar las opciones de control de NOx. Por ejemplo, si este sector se compara con el Sector de Vidrio para Envases, hay una serie de diferencias significativas, basadas principalmente en los requisitos de calidad de los productos y en los menores volúmenes de producción. Los hornos son en promedio sustancialmente menores (<160 toneladas/día), normalmente sólo se utiliza casco de vidrio interno, se requieren condiciones más oxidantes (y por lo tanto, se emplean mayores niveles de nitratos), el horno funciona normalmente a una temperatura ligeramente mayor, y el tiempo de estancia es hasta un 50% más largo. Todos estos factores producen un mayor consumo específico de energía y aumentan el potencial de formación de NOx.

Se ha realizado un trabajo considerable en modificaciones de la combustión, y en ciertos casos se han conseguido reducciones sustanciales de NOx. No obstante, la escala de las reducciones observadas en otros sectores no se ha conseguido en el Vidrio Doméstico, y se prevé la posibilidad de conseguir ulteriores desarrollos. Sobre la base de la experiencia en otros sectores, cabría esperar que la aplicación de medidas primarias en la combustión produjera reducciones en las emisiones de NOx del 20 - 40 %, es decir, del orden de 1.000 – 1.500 mg/Nm³, que generalmente equivale a 2,5 – 3,75 kg/tonelada de vidrio fundido.

En este sector se usan diversos hornos eléctricos, pero su viabilidad económica tiene un límite. En general, si la fusión eléctrica (100% o predominantemente eléctrica) es viable económicamente, y en particular para la producción de vidrio al plomo, vidrio de cristal y vidrio opalino, la técnica se considera como MTD. Las emisiones de NOx se limitan a la descomposición de nitratos, y los niveles de emisiones asociados con las MTD serán generalmente de 0,2 – 1,0 kg/tonelada de vidrio fundido, según el nivel de nitratos empleado. Como se ha indicado anteriormente, para formulaciones de vidrio de cristal menos volátiles pueden considerarse otras técnicas a la hora de determinar las MTD para una instalación determinada.

No hay ejemplos conocidos de SCR, SNCR o 3R/Recombustión en este sector. Hay algunos ejemplos de oxicombustión en hornos de Vidrio Doméstico, pero no generalmente a una escala representativa de plantas típicas con combustión de aire-combustible, es decir 50 – 160 toneladas/día. No hay obstáculos insalvables para la aplicación de estas técnicas, y es posible que la mayoría de las dificultades puedan superarse con tiempo y experiencia de uso.

Como se ha indicado anteriormente, es difícil extraer conclusiones firmes sobre qué constituye MTD para emisiones de NOx en el Sector del Vidrio Doméstico. Cuando la fusión eléctrica no es económicamente viable, pueden usarse una serie de otras técnicas. El sector utiliza una amplia gama de tipos de hornos, y la selección de la técnica más apropiada dependerá de las características de la instalación particular. Se prevé que, con el tiempo necesario para el desarrollo y puesta en práctica de las técnicas, el nivel de emisiones para óxidos de nitrógeno (expresado como NO₂) asociado con las MTD será de 500 – 700 mg/Nm³, que generalmente equivale a 0,5 – 1,75 kg/tonelada de vidrio fundido. Las principales técnicas (o combinaciones de las mismas) que pueden representar MTD en este sector son las medidas primarias (modificaciones de la combustión), 3R/Recombustión (para hornos regenerativos), oxicombustión, SNCR o SCR. Se afirma que, en un pequeño número de casos, el uso de 3R/Recombustión podría requerir una renovación del material refractario que aumentaría el coste global, y podría afectar la elección de MTD. Para hornos de fusión pequeños deberían también tenerse en consideración diseños innovadores como el horno de fusión Flex melter.

Se reconoce que estos niveles de eficacia representan una mejora significativa sobre la eficacia actual para muchas instalaciones, y por consiguiente representarían propuestas a medio plazo. Se recomienda encarecidamente realizar trabajo para determinar el potencial de reducción de NOx mediante medidas primarias para hornos de combustión por aire.

Para los procesos que requieran un uso sustancial de compuestos con nitratos en la mezcla, los niveles de emisiones arriba indicados pueden ser difíciles de conseguir sin eliminación secundaria. Si el uso de nitratos es muy frecuente o permanente, o si se generan emisiones muy elevadas, pueden ser necesarias técnicas secundarias. Si el uso de nitratos es infrecuente o los costes de medidas secundarias ulteriores no son económicamente viables, un nivel de emisiones más elevado puede representar MTD. Cuando sea practicable, el uso de nitratos debería minimizarse en la medida de lo posible. Excepto en circunstancias muy excepcionales, cabría esperar que el nivel de emisiones asociado con las MTD fuera inferior a 1500 mg/Nm³, que normalmente equivale a menos de 3 kg/tonelada de vidrio fundido.

5.6.3. Óxidos de Azufre

Para los niveles de emisiones indicados a continuación se supone el uso de eliminación secundaria de polvo, con lavado de gases ácidos seco o semiseco cuando proceda. Por consiguiente, en general en este sector, los niveles de emisiones asociados con las MTD para óxidos de azufre (expresados como SO₂) se considera que son:

- ❑ Para combustión a gas natural, 200 - 500 mg/Nm³, que normalmente equivale a 0,5 – 1,25 kg/tonelada de vidrio fundido. Cuando se utilizan bajos niveles de sulfatos, esta cifra es inferior a 200 mg/Nm³, que normalmente equivale a menos de 0,5 kg/tonelada de vidrio fundido.
- ❑ Para combustión a fuel-oil, 500 – 1.300 mg/Nm³, que normalmente equivale a 1,25 – 3,25 kg/tonelada de vidrio fundido.

Las cifras de las partes altas de estos rangos corresponden a instalaciones en las que el polvo recogido se recicla al horno. Si no se recicla el polvo, cabe esperar que las emisiones sean inferiores a los máximos indicados.

5.6.4. Otras Emisiones de la Fusión

En general, en este sector, la MTD se considera que es la selección de materias primas para minimizar las emisiones, en combinación con el lavado de gases ácidos. El lavado de gases ácidos puede ser necesario para proteger el equipo de eliminación o para alcanzar las cifras indicadas para SOx. En tal caso, el lavado de gases ácidos se considera que constituye MTD si los niveles abajo indicados no pueden alcanzarse con medidas primarias. Los niveles de emisiones asociados con las MTD para los contaminantes abajo indicados se considera que son:

✓ Cloruros (expresados como HCl)	<30 mg/Nm ³
✓ Fluoruros (expresados como HF)	<5 mg/Nm ³
✓ Metales (Grupo 1 + 2)	<5 mg/Nm ³
✓ Metales (Grupo 1)	<1 mg/Nm ³

Las clasificaciones de los metales y sus compuestos se indican en la Tabla 5.2.

Para la producción de vidrio al plomo y de vidrio de cristal, las cifras de <5 mg/Nm³ y <1 mg/Nm³ para metales implican generalmente el uso de filtros de mangas o de un PE de alta eficacia.

5.6.5. Procesos de Acabado

Las emisiones potenciales de los procesos de acabado consisten principalmente en polvo y vapores de gases ácidos de la producción de vidrio al plomo y de vidrio de cristal. Para actividades potencialmente polvorrientas, la MTD se considera el corte bajo líquido si es factible y, en caso corte o esmerilado seco, aspiración a un sistema de filtro de mangas. Cuando se generan gases o vapores ácidos, la MTD se considera el lavado húmedo. Los niveles de emisiones asociados con las MTD para los contaminantes abajo indicados se considera que son:

✓ Fluoruros (expresados como HF)	<5 mg/Nm ³
✓ Partículas	<10 mg/Nm ³
✓ Metales (Grupo 1 + 2)	<5 mg/Nm ³

Dentro de este sector hay emisiones potencialmente importantes al agua, que se discuten en los Capítulos 3 y 4. Los niveles de emisiones asociados con las MTD para estas actividades se indican en la Sección 5.11.

5.7. Vidrio Especial

Para este sector, los factores de conversión indicados en la Tabla 5.1 van desde $1,5 \times 10^{-3}$ (vidrio soluble) hasta $6,5 \times 10^{-3}$ (vitrocerámicas). En esta sección sería confuso dar las masas emitidas, que generalmente equivalen a las emisiones en concentración para cada uno de los seis factores de conversión separados. Por consiguiente, los niveles de emisiones se presentan sólo como concentraciones, y debe hacerse referencia a la Tabla 5.1 para determinar las correspondientes masas emitidas para cada tipo de producto.

5.7.1. Polvo

En general, en este sector, la MTD para polvo se considera que es el uso de un precipitador electrostático o filtro de mangas que opere, si es apropiado, en conjunción con un sistema de lavado de gases ácidos seco o semiseco. El nivel de emisiones asociado con estas técnicas es de 5 - 30 mg/Nm³. Los valores en la parte inferior del rango indicado son los que generalmente cabría esperar para sistemas de filtro de mangas. En algunos casos, la aplicación de las MTD para emisiones de metales puede producir menores niveles de emisiones para polvo.

5.7.2. Óxidos de Nitrógeno

En general, en este sector, el nivel de emisiones asociado con las MTD para óxidos de nitrógeno (expresado como NO₂) se considera que es de 500 - 700 mg/Nm³. Este nivel se basa principalmente en el uso de fusión con oxicombustión y SNCR o SCR. El sector del Vidrio Especial utiliza una amplia gama de tipos y tamaños de hornos. Hay otras técnicas para reducir las emisiones de NOx a niveles comparables, y la técnica más apropiada dependerá mucho de aspectos específicos del centro de producción. Hay también una serie de técnicas que pueden conseguir niveles por debajo de los indicados; no obstante, estas técnicas pueden no ser aplicables a todas las instalaciones. Cuando se utilicen elevados niveles de nitratos, deberá considerarse la minimización de su uso en la medida de lo posible dentro de las limitaciones del proceso y de los requisitos del producto.

En general, para la producción de vidrio soluble, el nivel de emisiones asociado con las MTD para óxido de nitrógeno (expresado como NO₂) se considera que es 500 - 700 mg/Nm³. Cuando las técnicas más apropiadas para una situación dada hagan necesario esperar hasta la próxima reconstrucción (Ej. oxicombustión o modificación de la geometría del horno), tales niveles pueden no ser alcanzables hasta después de la reconstrucción. Sólo con el uso de medidas primarias cabe esperar niveles de emisiones de 600 - 850 mg/Nm³ para hornos de combustión con aire.

5.7.3. Óxidos de Azufre

Para los niveles de emisiones abajo indicados se supone el uso de eliminación secundaria de polvo, con lavado de gases ácidos seco o semiseco cuando sea apropiado. Por consiguiente, en general en este sector, los niveles de emisiones asociados con las MTD para óxidos de azufre (expresados como SO₂) se considera que son:

- ❑ Para combustión a gas natural, 200 - 500 mg/Nm³; si se utilizan niveles bajos de sulfatos, esta cifra es inferior a 200 mg/Nm³.
- ❑ Para combustión a fuel-oil, 500 - 1200 mg/Nm³.

Las cifras de las partes altas de estos rangos corresponden a instalaciones en las que el polvo recogido se recicla al horno. Si no se recicla el polvo, cabe esperar que las emisiones sean inferiores a los máximos indicados.

5.7.4. Otras Emisiones de la Fusión

En general, en este sector, la MTD se considera que es la selección de materias primas para minimizar las emisiones, en combinación con el lavado de gases ácidos. El lavado de gases ácidos puede ser necesario para proteger el equipo de eliminación o para alcanzar las cifras indicadas para SOx. En tal caso, el lavado de gases ácidos se considera que constituye MTD si los niveles abajo indicados no pueden alcanzarse con medidas primarias. Los niveles de emisiones asociados con las MTD para los contaminantes abajo indicados se considera que son:

✓ Cloruros (expresados como HCl)	<30 mg/Nm ³
✓ Fluoruros (expresados como HF)	<5 mg/Nm ³
✓ Metales (Grupo 1 + 2)	<5 mg/Nm ³
✓ Metales (Grupo 1)	<1 mg/Nm ³

Las clasificaciones de los metales y sus compuestos se indican en la Tabla 5.2.

5.7.5. Procesos de Acabado

Las emisiones asociadas con los procesos de acabado pueden ser muy variables, y puede usarse una amplia gama de técnicas primarias y secundarias. Para actividades potencialmente polvorrientas, la MTD se considera la minimización del polvo mediante corte, esmerilado o pulido bajo líquido, o la aspiración a un sistema de filtro de mangas cuando se realicen actividades secas. Cuando se generen gases o vapores ácidos, la MTD se considera el lavado húmedo. Los niveles de emisiones asociados con las MTD para los contaminantes abajo indicados se considera que son:

✓ Fluoruros (expresados como HF)	<5 mg/Nm ³
✓ Partículas	<5 mg/Nm ³
✓ Metales (Grupo 1 + 2)	<5 mg/Nm ³
✓ Metales (Grupo 1)	<1 mg/Nm ³

Las clasificaciones de los metales y sus compuestos se indican en la Tabla 5.2.

Dentro de este sector hay emisiones potencialmente importantes al agua, que se discuten en los Capítulos 3 y 4, y los niveles de emisiones asociados con las MTD para estas actividades se indican en la Sección 5.11.

5.8. Lana Mineral

5.8.1. Polvo

En general, en este sector, la MTD para el polvo se considera que es el uso de un precipitador electrostático o de un filtro de mangas. En la producción de lana de vidrio, el uso de un sistema de lavado de gases ácidos seco o semiseco no se considera normalmente necesario para proteger el equipo, ya que casi todos los hornos son con combustión a gas o eléctricos. El nivel de emisiones asociado con estas técnicas es de 5 - 30 mg/Nm³, que normalmente equivale a menos de 0,1 kg/tonelada de vidrio fundido. Los valores en la parte inferior del rango indicado son los que generalmente cabría esperar para sistemas de filtro de mangas. En algunos casos, la aplicación de las MTD para emisiones de metales puede producir menores niveles de emisiones para polvo. Los cubilotes están generalmente equipados con filtros de mangas en lugar de precipitadores electrostáticos, debido al riesgo de explosión.

En la producción de lana de vidrio, la naturaleza del polvo implica que el enfriamiento del gas residual y la posición del sistema de eliminación son muy importantes para optimizar la eficacia de la eliminación. En algunos casos, puede haber ya instalado equipo de eliminación que cumpla los requisitos de MTD en su diseño general pero que pueda haber sido instalado para cumplir un objetivo menos exigente y por lo tanto no esté idealmente posicionado. Si el equipo existente es capaz de alcanzar niveles de emisiones de 50 mg/Nm³ en lugar de 30 mg/Nm³ como se describe arriba, los costes de sustitución o modificaciones importantes antes de la próxima reconstrucción podrían ser desproporcionados en relación con las ventajas obtenidas.

5.8.2. Óxidos de Nitrógeno

En general, para la producción de lana de vidrio, la MTD para óxidos de nitrógeno (expresados como NO₂) se considera que es el uso de la oxicombustión o de la fusión predominantemente eléctrica. El nivel de emisiones asociado con las MTD se considera que es de 500 - 700 mg/Nm³, que generalmente equivale a 0,5 – 1,4 kg/tonelada de vidrio fundido. En la mayoría de aplicaciones, cabe esperar que la oxicombustión o la fusión predominantemente eléctrica alcancen emisiones inferiores a 1 kg/tonelada de vidrio fundido. No obstante, los sistemas convencionales de aire-gas pueden ser capaces de conseguir emisiones dentro de los rangos indicados con medidas primarias o secundarias. En tal caso, puede considerarse que tales sistemas también constituyen MTD.

Cuando en la mezcla se requieran cantidades considerables de nitratos (Ej. para reciclar material con un elevado componente orgánico), los niveles de emisiones arriba indicados pueden ser difíciles de alcanzar sin eliminación secundaria o conversión a oxícombustión o fusión eléctrica. Si el uso de nitratos es muy frecuente o permanente, o si se generan emisiones muy elevadas, tales técnicas pueden constituir MTD y cabría esperar que alcanzaran menos de 700 mg/Nm³, que generalmente equivale a menos de 1,4 kg/tonelada de vidrio fundido.

Los cubilotes de lana de vidrio no suelen generar emisiones sustanciales de NOx, y pueden obtenerse emisiones de menos de 0,5 kg/tonelada de material fundido sin controles específicos. Si se utilizan hornos de cuba, el nivel de emisiones asociado con las MTD se considera que es equivalente al de la producción de lana de vidrio.

5.8.3. Óxidos de Azufre

En general, para la producción de lana de vidrio, las emisiones de óxidos de azufre (expresadas como SO₂) suelen ser muy bajas. Casi todos los hornos son de combustión a gas o eléctricos, y sólo se utilizan niveles muy bajos de sulfatos. En estas circunstancias, cabría esperar que las emisiones de SOx estuvieran por debajo de 50 mg/Nm³, que generalmente equivale a menos de 0,1 kg/tonelada de vidrio fundido, sin medidas de eliminación específicas. Si los hornos son de combustión a fuel-oil, normalmente será necesario un lavado de gases ácidos para proteger el equipo de eliminación de polvo, en cuyo caso el nivel de emisión asociado con las MTD se considera que es de 300 - 1000 mg/Nm³, que normalmente equivale a 0,6 – 2,0 kg/tonelada de vidrio fundido.

Para producción de lana de roca, el nivel de emisiones asociado con las MTD para óxidos de azufre (expresados como SO₂) se considera que es de menos de 600 mg/Nm³, que generalmente equivale a menos de 1,5 kg/tonelada de vidrio fundido. Estos valores corresponden a situaciones en los que la prioridad es el reciclaje de residuos de proceso y la prevención de la generación de otros residuos sólidos para desecho. No obstante, cuando desde un enfoque medioambiental integral la prioridad sea la reducción de las emisiones de SOx, y la correspondiente evaluación del balance de masa no permita la obtención de estos valores, el uso de lavado de gases ácidos puede representar MTD. Estos sistemas comportan costes importantes y, en general, el material recogido no puede reciclarse eficazmente, lo que da lugar a residuos sólidos para desecho. Si el lavado de gases ácidos se considera que representa MTD, el lavado seco se considera la técnica más rentable. En tales casos, el nivel de emisiones asociado con las MTD para óxidos de azufre (expresados como SO₂) se considera que es de menos de 200 mg/Nm³ que equivale a menos de 0,5 kg/tonelada de vidrio fundido.

Los niveles arriba indicados hacen referencia principalmente a fusión con mezclas de roca pero, cuando la mezcla contiene briquetas aglomeradas con cemento, hay una contribución del azufre presente en el cemento. El efecto sobre las emisiones de SO₂ dependerá evidentemente de la cantidad de material reciclado en forma de briquetas. Por ejemplo, a un 45% de sustitución de briquetas por roca, el nivel de emisiones asociado con las MTD sería inferior a 1.100 mg/Nm³, que generalmente equivale a menos de 2,7 kg/tonelada de vidrio fundido. Cuando la prioridad es la reducción de SO₂, el lavado de gases ácidos se considera generalmente que representa la MTD, y el nivel de emisiones asociado sería inferior a 350 mg/Nm³, que generalmente equivale a menos de 0,8 kg/tonelada de vidrio fundido. La sustitución a más del 45% es rara, y para cada instalación debe realizarse un balance de azufre con el fin de determinar los niveles de emisiones apropiados compatibles con las MTD.

Si las briquetas contienen también polvo reciclado recogido del equipo de eliminación, esto supondrá una nueva contribución de azufre. La concentración de azufre en el polvo recogido varía considerablemente de una instalación a otra, generalmente entre 0,05 y 0,28 %. A continuación se indican los niveles de emisiones asociados con las MTD. Como se ha indicado anteriormente, para cada instalación debe realizarse un balance de azufre con el fin de determinar los niveles de emisiones apropiados compatibles con la MTD.

- Cuando la prioridad es la minimización de residuos, 1.400 mg/Nm³, que generalmente equivale a 3,4 kg/tonelada de vidrio fundido.
- Cuando la prioridad es la reducción de SO₂, 400 mg/Nm³, que generalmente equivale a 1,0 kg/tonelada de vidrio fundido.

El uso de escoria de alto horno no se considera generalmente MTD y si su uso es necesario por motivos de producto o proceso, MTD se considera la inclusión de un lavado seco.

5.8.4. Otras Emisiones de la Fusión

Las emisiones de haluros y metales tienden a ser muy bajas en estos procesos, y los niveles de emisiones indicados a continuación pueden conseguirse normalmente mediante la selección de materias primas. Los cubilotes de lana de roca pueden producir elevadas emisiones de sulfuro de hidrógeno y de monóxido de carbono. La MTD para las emisiones de sulfuro de hidrógeno se considera que es la selección de materias primas o la oxidación térmica. La MTD para emisiones de monóxido de carbono se considera que es la oxidación térmica. En general, en este sector, los niveles de emisiones asociados con las MTD para los contaminantes abajo especificados se considera que son:

✓ Cloruros (expresados como HCl)	<30 mg/Nm ³
✓ Fluoruros (expresados como HF)	<5 mg/Nm ³
✓ Sulfuro de hidrógeno (H ₂ S)	<5 mg/Nm ³
✓ Monóxido de carbono (CO)	<200 mg/Nm ³
✓ Metales (Grupo 1 + 2)	<5 mg/Nm ³
✓ Metales (Grupo 1)	<1 mg/Nm ³

Las clasificaciones de los metales y sus compuestos se indican en la Tabla 5.2.

5.8.5. Procesos de Acabado

Emisiones de la zona de moldeo y emisiones combinadas de moldeo y polimerización

Después de la optimización de las medidas primarias, la MTD se considera el uso de un precipitador electrostático húmedo, un lavador de lecho lleno o un filtro de lana de roca (generalmente sólo en procesos de lana de roca). La eficacia de estas técnicas varía. El precipitador electrostático húmedo y el filtro de lana de roca son más eficaces en la eliminación de partículas sólidas y gotas, y el lavador de lecho lleno es más eficaz en la eliminación de sustancias gaseosas. Estos aspectos y la eficacia correspondiente de cada técnica se describen en el Capítulo 4. No se considera útil utilizar ambas técnicas juntas. Los niveles de emisiones asociados con las MTD para los contaminantes especificados a continuación se consideran que son:

✓ Total partículas	20 - 50 mg/Nm ³
✓ Fenol	5 - 15 mg/Nm ³
✓ Formaldehído	5 - 10 mg/Nm ³
✓ Amoniaco	30 - 65 mg/Nm ³
✓ Aminas	<5 mg/Nm ³
✓ Total Compuestos Orgánicos Volátiles	10 - 50 mg/Nm ³

En general, no cabe esperar emisiones en el extremo superior de todos los rangos. Si se utiliza un precipitador electrostático húmedo o un filtro de lana de roca, cabe esperar unas emisiones totales de partículas hacia la parte inferior del rango; y, cuando se utiliza un lavador de lecho relleno, cabe esperar emisiones gaseosas hacia la parte inferior del rango.

Emisiones del horno de polimerización

En la producción de lana de vidrio, las MTD y los niveles de emisiones asociados se considera que son los arriba indicados, excepto para las emisiones de fenol, en las que el nivel de emisión asociado es 5 -10 mg/Nm³.

En general, para los procesos de lana de roca, la MTD se considera que es el uso de un incinerador térmico, y los niveles de emisiones asociados con las MTD para los contaminantes especificados a continuación se considera que son:

✓ Total partículas	5 - 30 mg/Nm ³
✓ Fenol	<5 mg/Nm ³
✓ Formaldehído	<5 mg/Nm ³
✓ Amoniaco	<20 - 65 mg/Nm ³ ó < 0,4 kg/tonelada de producto acabado (hasta un máximo de 100 mg/Nm ³)
✓ Aminas	<5 mg/Nm ³
✓ Total Compuestos Orgánicos Volátiles	<10 mg/Nm ³

Los niveles de emisiones asociados con las MTD arriba indicados para las emisiones de la zona de moldeo y del horno de polimerización pueden no ser alcanzables con estas técnicas en todas las circunstancias. Si se producen productos de alta densidad o productos con un elevado contenido de aglomerantes, los niveles alcanzables con las técnicas consideradas generalmente como MTD para el sector podrían ser considerablemente superiores. Si este tipo de productos representan la mayoría de la producción de una instalación dada, deberán tenerse en consideración otras técnicas.

Para las emisiones de la zona de moldeo y del horno de polimerización, la cifra indicada para aminas (<5 mg/Nm³) se basa en el uso de aglomerantes sin aminas y resinas catalizadas sin aminas.

Las emisiones del enfriamiento de los productos pueden tratarse por separado o en combinación con las emisiones de moldeo o polimerización. Cuando se tratan por separado, los niveles de emisiones asociados con las MTD se considera que son iguales o inferiores a los del área moldeo. La MTD para partículas de otras actividades de acabado como mecanizado y embalaje se considera que es el uso de un sistema de filtro de mangas. El nivel de emisión asociado con la MTD se considera inferior a 5 mg/Nm³.

5.9. Fibra Cerámica

5.9.1. Fusión

La MTD para la fusión en este sector se considera que es la fusión eléctrica en conjunción con un sistema de filtro de mangas. Los niveles de emisiones asociados con las MTD para los contaminantes abajo especificados se considera que son:

✓ Partículas	<10 mg/Nm ³
✓ Óxidos de nitrógeno (como NO ₂)	<0,1 – 0,5 kg/tonelada material fundido

✓ Óxidos de azufre (como SO ₂)	<0,1 – 0,5kg/tonelada material fundido
✓ Cloruros (expresados como HCl)	<10 mg/Nm ³
✓ Fluoruros (expresados como HF)	<5 mg/Nm ³
✓ Metales (Grupo 1 + 2)	<5 mg/Nm ³
✓ Metales (Grupo 1)	<1 mg/Nm ³

Las clasificaciones de los metales y sus compuestos se indican en la Tabla 5.2.

5.9.2. Procesos de Acabado

La MTD para todas las zonas en las que puede producirse polvo en este sector se considera que es la recolección y aspiración a un sistema de filtro de mangas. Los niveles de emisiones asociados con la MTD para los contaminantes indicados a continuación se considera que son:

✓ Partículas	5 mg/Nm ³
✓ Fibra cerámica (Nota1)	1 mg/Nm ³
✓ Compuestos Orgánicos Volátiles	10 - 20 mg/Nm ³

Nota 1

En este contexto, una fibra se define como un objeto de longitud superior a 5 µm, anchura inferior a 3 µm y con una relación longitud/anchura mayor de 3:1.

5.10. Fritas

5.10.1. Polvo

En general, en este sector, la MTD para polvo se considera que es el uso de un precipitador electrostático o de un filtro de mangas que opere, si es apropiado, en conjunción con un sistema de lavado de gases ácidos seco o semiseco. El nivel de emisiones asociado con estas técnicas es de 5 - 30 mg/Nm³, que normalmente equivale a menos de 0,1 kg/tonelada de vidrio fundido. Los valores en la parte inferior del rango indicado son los que generalmente cabría esperar para sistemas de filtro de mangas. En algunos casos, la aplicación de las MTD para emisiones de metales puede producir menores niveles de emisiones para polvo.

Se reconoce que estos niveles de eficacia representan una mejora significativa sobre los valores actuales para muchos hornos continuos, y por consiguiente podrían representar propuestas a medio término para dichos hornos. No hay obstáculos técnicos insalvables para alcanzar 30 mg/Nm³, y dado el tiempo necesario para el desarrollo y la puesta en práctica de las técnicas apropiadas, esta cifra debe ser alcanzable.

5.10.2. Óxidos de Nitrógeno

En general, en este sector, la MTD para óxidos de nitrógeno (expresados como NO₂) se considera que el uso de fusión con oxicombustión. El nivel de emisión asociado con las MTD se considera que es 0,5 – 1,5 kg/tonelada de vidrio fundido o alternativamente 500 - 700 mg/Nm³, si los sistemas convencionales de aire-gas pueden conseguir este nivel con medidas primarias o secundarias.

Se reconoce que estos niveles de eficacia representan una mejora significativa sobre los valores actuales para muchos hornos continuos, y por consiguiente podrían representar propuestas a medio término

no para dichos hornos. No hay obstáculos técnicos insalvables para alcanzar los niveles de emisiones arriba indicados, y dado el tiempo necesario para el desarrollo y la puesta en práctica de las técnicas apropiadas, esta cifra debe ser alcanzable.

5.10.3. Óxidos de Azufre

En general, para la producción de fritas, la MTD para óxidos de azufre (expresados como SO₂) se considera que es la selección del combustible (cuando es factible) y el control de la composición de la mezcla. El nivel de emisión asociado con la MTD se considera que es de 0,1 – 0,5 kg/tonelada de vidrio fundido, que generalmente equivale a menos de 200 mg/Nm³. Si se utiliza combustión a fuel-oil o si la mezcla contiene niveles considerables de sulfato, el nivel de emisión asociado con la MTD es de 500 – 1.000 mg/Nm³.

5.10.4. Otras Emisiones de la Fusión

En general, en este sector, los niveles de emisiones asociados con las MTD para los contaminantes especificados a continuación son:

✓ Cloruros (expresados como HCl)	<10 mg/Nm ³
✓ Fluoruros (expresados como HF)(Nota1)	<5 mg/Nm ³
✓ Metales (Grupo 1 + 2)	<5 mg/Nm ³
✓ Metales (Grupo 1)	<1 mg/Nm ³

Las clasificaciones de los metales y sus compuestos se indican en la Tabla 5.2.

Nota 1

Si las materias de la mezcla contienen niveles considerables de fluoruros, este nivel se basa en el uso de un sistema de lavado de gases ácidos.

5.10.5. Procesos de Acabado

La única emisión probable de estas actividades es el polvo y se considera MTD el uso de un sistema de filtro de mangas. Los niveles de emisiones asociados con la MTD se considera que son 5 - 10 mg/Nm³ para partículas y <5 mg/Nm³ para Metales (Grupo 1 y + 2).

5.11. Emisiones al Agua

Las emisiones acuosas de las actividades de la industria del vidrio son generalmente bajas y no específicas de la industria. No obstante, una serie de actividades pueden originar emisiones acuosas más significativas. Los niveles de emisiones abajo indicados se consideran normalmente apropiados para la protección del medio acuático y son indicativos de los niveles de emisiones que se alcanzarían con las técnicas que normalmente se consideran como MTD. No representan necesariamente los niveles alcanzados actualmente en la industria, sino que se basan en el criterio experto del TWG.

✓ Sólidos en suspensión	< 30 mg/l
✓ Demanda química de oxígeno (Nota 1)	100 - 130 mg/l
✓ Amoniaco (Kjeldahl)	<10 mg/l
✓ Sulfatos	<1.000 mg/l
✓ Fluoruros	15 - 25 mg/l

✓ Arsénico	< 0,3 mg/l
✓ Antimonio	< 0,3 mg/l
✓ Bario	< 3,0 mg/l
✓ Cadmio	< 0,05 mg/l
✓ Cromo (Total)	< 0,5 mg/l
✓ Cobre	< 0,5 mg/l
✓ Plomo (Nota 2)	< 0,5 mg/l
✓ Níquel	< 0,5 mg/l
✓ Estaño (Nota 3)	< 0,5 mg/l
✓ Zinc	< 0,5 mg/l
✓ Fenol	< 1,0 mg/l
✓ Ácido bórico	2 - 4 mg/l
✓ pH	6,5 - 9
✓ Aceite mineral	< 20 mg/l

Nota 1

Para el sector de fibra de vidrio de filamentos continuos, esta cifra se considera que es 200 mg/l. En general, la Demanda Química de Oxígeno es bastante baja, y el nivel real asociado con la MTD puede depender del agua receptora. Si el agua receptora es particularmente sensible, pueden requerirse niveles inferiores a esta cifra.

Nota 2

Para instalaciones de vidrio doméstico que utilicen cantidades considerables de compuestos de plomo, 1,0 mg/l se considera actualmente más apropiado. No hay obstáculos técnicos insalvables para conseguir 0,5 mg/l y, con el tiempo necesario para el desarrollo y aplicación de las técnicas apropiadas, esta cifra será alcanzable.

Nota 3

Para procesos de vidrio para envases que utilicen lavadores acuosos para tratar las emisiones de acabado, un nivel de emisión de < 3 mg/l es más apropiado.

El vertido a una instalación de tratamiento de aguas residuales u otro tratamiento externo puede también constituir MTD. Si se propone este enfoque, debe considerarse la idoneidad de la instalación receptora.

5.12. Otros Residuos

Cuando sea posible la prevención de la contaminación o, cuando ello no sea posible, la minimización de los residuos por métodos primarios, se considera que constituye MTD.

Cuando sea viable, el reciclaje en el proceso de vidrio recuperado o de residuos de otros procesos se considera como MTD. El material fino a reciclar a un cubilote requiere generalmente un tratamiento

como el briquetado. En el sector de Fibra de Vidrio de Filamentos Continuos, el reciclaje de residuos de proceso ha demostrado ser difícil, por lo que se recomienda un mayor trabajo de desarrollo.

El reciclaje al proceso de partículas recogidas de los caudales de gases residuales, si es practicable, se considera que constituye MTD (esto no incluye los residuos del regenerador). En la mayoría de operaciones de fusión en las que se utilizan sistemas de recolección secos, esto supone un simple ajuste de la formulación de la mezcla para poder integrar la composición del material recogido. Las dificultades asociadas con el reciclaje del material recogido de los sistemas de lavado seco se discuten en el Capítulo 4. En algunas circunstancias deberá llegarse a un compromiso entre alcanzar los niveles indicados para las emisiones a la atmósfera y minimizar la producción de una corriente de residuos sólidos. Cuando se da esta circunstancia, debe considerarse sobre la base de la instalación específica, y en las prioridades relativas para la minimización de la contaminación del medio ambiente en su conjunto.

Si las condiciones lo permiten, el máximo uso de vidrio recuperado y de residuos reciclados (tanto internos como externos) se considera como complementario a las MTD, en base a:

- ✓ Reducción de residuos (sólo in situ).
- ✓ Mejora general de la eficacia energética.
- ✓ Contribución a la minimización de una serie de otras emisiones.
- ✓ Reducción del consumo de recursos naturales.

CAPÍTULO 6. TÉCNICAS EMERGENTES

La Industria del Vidrio puede ser muy innovadora en sus productos y aplicaciones, especialmente en los campos de la industria de bajo volumen de producción y productos de alto valor. Las innovaciones en las operaciones de fusión tienden a ser más graduales y por incrementos, y se basan en ocasiones en la adaptación de conceptos existentes. Las inversiones en los hornos de vidrio son sustanciales, y las modificaciones son difíciles hasta una nueva reconstrucción. Si se producen problemas durante la campaña, el tiempo de producción perdido y las reparaciones pueden ser muy costosos, especialmente si debe dejarse que se enfrie el horno. Por lo tanto, las modificaciones importantes suponen un riesgo bastante elevado, por lo que las empresas necesitan estar bastante seguras de la eficacia antes de poner en práctica nuevos diseños y tecnologías. Análogamente, los efectos de cualquier tecnología nueva sólo puede evaluarse plenamente a lo largo de una campaña completa.

La presión creciente por mejorar la eficacia medioambiental ha demostrado ser un fuerte estímulo para la innovación, particularmente en el desarrollo de alternativas a equipos de eliminación secundaria potencialmente costosos. Por ejemplo:

- ❑ El proceso 3R fue desarrollado a partir del principio de reducción química por combustible, que se ha utilizado convencionalmente en plantas de combustión grandes. Aunque se basa en la adaptación de un principio existente, fue necesario un considerable esfuerzo de desarrollo e innovación para poder aplicar el principio con éxito en hornos de vidrio.
- ❑ El sistema FENIX es una optimización de las condiciones de combustión del horno basado en modificaciones de los quemadores y un conocimiento detallado de los factores que afectan la formación de NOx y el modo en que interactúan en el entorno del horno.
- ❑ Los sistemas de quemadores bajos en NOx, que fueron desarrollados originalmente para otras aplicaciones, han sido modificados específicamente para hornos de vidrio.
- ❑ El horno de fusión Sorg LoNOx (bajo en NOx) es un rediseño innovador de un horno de vidrio convencional para minimizar la formación de NOx y potenciar al máximo la recuperación de calor.

No se esperan grandes avances tecnológicos a medio plazo, pero hay una serie de técnicas en constante desarrollo para optimizar sus beneficios, lo que puede hacerlas más atractivas para la industria a largo plazo. Hay también una serie de conceptos totalmente nuevos en fase de desarrollo, aunque no se espera que tengan aplicación en la industria en un plazo previsible.

Este capítulo discute brevemente las técnicas que están disponibles y no pueden considerarse como emergentes, pero que es probable que sean objeto de nuevos desarrollos (Secciones 6.1 a 6.6), así como técnicas más innovadoras a largo plazo que todavía se encuentra en fase de aplicación piloto.

6.1. Sistemas de Quemadores de Bajo NOx

Los nuevos sistemas de quemadores son todavía objeto de desarrollo y cabe anticipar la aparición de nuevos avances. La aplicación combinada de estos nuevos quemadores y de avanzados métodos de control de combustión, unida al uso de métodos analíticos de los gases de combustión muestra un potencial de ulterior reducción de la formación de NOx. Asimismo, se están diseñando hornos para optimizar la geometría de los nuevos sistemas de combustión. No obstante, hay algunos aspectos tecnológicos a considerar a medida que continúan los desarrollos, como por ejemplo:

- ✓ Hay un posible riesgo de daños al material refractario de los quemadores por las partes reductoras de las llamas, que tocan los refractarios; y
- ✓ Las condiciones reductoras sobre la capa externa del material fundido o de la mezcla podrían afectar la calidad del vidrio y causar la descomposición prematura de los sulfatos, obligando a

agregar más sulfatos para asegurar un afino completo, lo que podría aumentar las emisiones de SOx.

6.2. Fusión con oxicombustión

No puede considerarse una técnica emergente, y se describe en detalle en el Capítulo 4. No obstante, es todavía objeto de desarrollo, incluso en aquellos sectores donde está consolidado su uso. La mayoría de los primeros hornos a plena escala productiva tienen todavía menos de 10 años, pero los hornos más recientes han incorporado modificaciones basadas en la experiencia hasta la fecha. También ha habido desarrollos en los sistemas de quemadores para aplicar las ventajas de los quemadores bajos en NOx.

Las instalaciones existentes se basan todavía en hornos convencionales de recuperación de llama transversal. A medida que se aplican técnicas de simulación mediante modelos matemáticos y se adquiere mayor experiencia, es probable que se produzcan nuevos desarrollos de esta técnica, particularmente con respecto a la geometría del horno. Asimismo, con el tiempo se hará más evidente para qué aplicaciones es más adecuada la técnica, y en qué aplicaciones ofrece pocas o nulas ventajas globales. Como se indica en el Capítulo 4, un campo de desarrollo potencial es el uso de sistemas de recuperación de calor en la fusión con oxicombustión.

6.3. Precalentamiento del Casco de Vidrio y de la Mezcla

Los principales ejemplos de estas técnicas se describen en el Capítulo 4, y de nuevo no se consideran técnicas emergentes, pero son objeto de un desarrollo considerable. Se prevé que el uso de estas técnicas se haga más generalizado a medida que se resuelvan los problemas operativos y aumente la experiencia. Muchos sectores trabajan en iniciativas para aumentar el uso de residuos de consumo y de procesos secundarios. Si estos desarrollos continúan según lo previsto, la aplicabilidad de estas técnicas puede verse aumentada.

6.4. Formulación de la Mezcla

Actualmente hay una serie de desarrollos interesantes en relación con la formulación de la mezcla, que se resumen a continuación.

Como se discute en la Sección 4.4.1.1, en los sectores de vidrio sodocálcico se están desarrollando formulaciones que, en combinación con otras técnicas, reducen las emisiones de polvo. Se asegura que en muchas aplicaciones podrían ser posibles niveles de emisiones del orden de 70 - 100 mg/Nm³.

En Alemania y Holanda se han iniciado proyectos de investigación para el desarrollo de nuevas materias primas con selenio con menor volatilidad y una mejor eficacia decolorante. La aplicación de estas nuevas materias primas con selenio podría limitar las emisiones de selenio en el futuro durante la producción de vidrio para vajillas y vidrio al sílex. De momento, no hay más información disponible.

Un productor ha desarrollado una nueva composición de vidrio para fibra de vidrio de filamentos continuos. Esta composición de vidrio no incluye boro ni tiene adición de fluoruros. La reducción de las emisiones de fluoruros es debida al hecho de que, al no tener fluoruros añadidos en la composición del vidrio, las emisiones se limitan a las impurezas de fluoruros presentes en las materias primas, lo que produce emisiones de fluoruros por debajo de 50 mg/Nm³. El mecanismo de formación de partículas en las formulaciones estándar de vidrio-E (E-glass) está gobernado por la volatilización de los boratos. Más del 85% de las partículas emitidas por el horno están relacionadas con el boro, y la eliminación de los boratos del vidrio produce una reducción sustancial en la formación de partículas, generalmente hasta menos de 50 mg/Nm³.

La eliminación del boro y de los fluoruros añadidos hacen que el vidrio sea más difícil de fundir (mayor temperatura de fusión) y de fibrar, lo que puede aumentar algo en consumo energético. Es necesario disponer de más experiencia para determinar la resistencia a largo plazo de los refractarios del horno. La

aplicación de esta formulación el vidrio requiere asimismo la cualificación de diversos tipos de productos y modificaciones en las operaciones de fusión y moldeo. No obstante, se considera una vía prometedora para conseguir importantes reducciones de emisiones por medios primarios. Esta técnica ha sido desarrollada por una empresa y está protegida por patentes, por lo que no está generalmente disponible en el sector.

6.5. Integración de Procesos de Fritas

En España se ha patentado una técnica que comporta el diseño de instalaciones de fritas con hornos múltiples de tipo modular, lo que permite agrupar tipos de producción similares. Este enfoque permite el uso de recuperadores para precalentar el aire de combustión, y también puede hacer que la eliminación y reciclaje del polvo sean más económicos.

6.6. Recirculación del Gas de Combustión

El gas residual del horno podría en principio reinyectarse a la llama para reducir el contenido de oxígeno y por consiguiente la temperatura y la eficacia de formación de NOx. Este tipo de proceso se utiliza ampliamente en la tecnología de combustión, y también más recientemente en la industria metalúrgica. Para la Industria del Vidrio, parece plantear posibles dificultades con respecto a la estabilidad de la llama, la eficacia de la combustión, así como respecto a las emisiones de CO, hidrocarburos no combustionados y sólidos. La estabilidad de los refractarios de los regeneradores podría también ser una fuente de problemas para su aplicación en hornos regenerativos. Se han obtenido resultados alentadores a escala de laboratorio y en un horno piloto, pero se han registrado dificultades al aplicar esta técnica a escala industrial, y parece necesario realizar una mayor investigación para evaluar plenamente el potencial de esta tecnología.

El concepto reciente de “aire sintético”, basado en la combinación del gas de combustión y el uso de oxicombustión, es también una técnica emergente potencialmente valiosa. En el momento presente no hay experiencia práctica relativa a este proceso.

6.7. Programa de Investigación Glasulin

Se trata de un proyecto conjunto entre 17 empresas de fabricación de vidrio y 4 institutos de investigación, cuyo objetivo es desarrollar nuevos métodos para la reducción de los niveles de sulfatos en la mezcla. Este trabajo comporta el uso de sensores de azufre, que mejora la comprensión del proceso de afino con sulfatos y el control del estado redox (que permite una menor adición de sulfato manteniendo la eficacia de afino requerida). La reducción de las emisiones de SO₂ que puede conseguirse controlando la adición de sulfato y el estado redox depende mucho de la calidad del vidrio recuperado, de la relación entre vidrio recuperado y mezcla, de la calidad requerida del vidrio y del tipo de combustible empleado. En algunos casos, las emisiones de SO₂ pueden reducirse en hasta un 30 - 40 %.

A menudo se agregan nitratos a los procesos de fusión de vidrio que utilizan óxidos de antimonio o de arsénico como agentes de afino. Los nitratos (como oxidantes) se agregan a las mezclas que contienen escoria u otros materiales reciclados ricos en componentes orgánicos. Los nitratos oxidan los compuestos orgánicos en la capa exterior de la mezcla entre 500 y 900 °C. Es necesaria una mayor investigación para optimizar el estado redox de las mezclas sin un uso excesivo de nitratos. Algunas empresas han desarrollado técnicas de incineración o pirolisis para quemar los componentes orgánicos antes de reciclar la chatarra interna (residuos de lana o fibras) al horno de fusión de vidrio, limitando con ello la cantidad de nitratos necesaria.

6.8. Nuevos Diseños de Hornos de Fusión

6.8.1. Horno de Fusión Segmentada Seg-Melter

El concepto de fusión segmentada intenta aprovechar los distintos requisitos de fusión de las dos

principales materias primas utilizadas en la fabricación de vidrio para envases, mezcla y casco de vidrio. La mezcla pura funde a aproximadamente 1.400 °C con un tiempo de estancia de 24 horas, mientras que el vidrio recuperado requiere una temperatura de fusión de sólo 1.100 °C y un tiempo de estancia de 1 – 2 horas.

La mezcla se introduce en un horno de prefusión 100% eléctrico, capaz de convertir el 75% de las materias primas en vidrio. La mezcla prefundida pasa luego a través de una garganta a una perrera ampliada en la que se agrega vidrio recuperado (el vidrio recuperado supone al menos un 60% de la materia prima). La mezcla/casco de vidrio entra luego en la segunda cámara de fusión. Allí es quemada con combustión a fuel-oil o gas, utilizando quemadores de oxicombustión, y obteniéndose vidrio con un grosor inferior al de la sección de prefusión.

El sistema ofrece una serie de ventajas potenciales:

- ✓ Las emisiones durante la etapa de prefusión eléctrica se eliminan casi por completo;
- ✓ El consumo de combustible en la segunda cámara de fusión es menor, ya que el vidrio recuperado funde a una temperatura más baja que la mezcla;
- ✓ El uso de quemadores de oxicombustión minimiza las emisiones de NOx de la segunda cámara de fusión;
- ✓ La segunda cámara de fusión puede ser de menor tamaño gracias al menor tiempo de estancia requerido.

Para un horno de 230 toneladas/día convertido a Seg-melter, las eficacias térmicas son más de un 25% mayores que las conseguidas con la fusión convencional. No obstante, los requisitos de mantenimiento pueden ser mayores. Aunque la campaña completa se ha estimado en 15 años, la sección de fusión eléctrica del horno Seg-melter puede requerir reparaciones cada tres años aproximadamente, y mientras la sección con combustión a fuel-oil puede seguir funcionando con un mezcla reducida [tm5 EEO].

6.8.2. Horno de Fusión Avanzado (Advanced Glass Melter o AGM)

El Horno de Fusión Avanzado (Advanced Glass Melter (AGM)), actualmente en desarrollo, emplea un concepto totalmente distinto para el precalentamiento y la fusión de la mezcla. Las materias primas de la mezcla se inyectan en la zona de reacción de la llama en un combustor a gas natural. Se produce un calentamiento rápido mientras las materias están en suspensión, y tanto los productos de combustión como las materias primas de la mezcla calentados se descargan a través de un inyector de alta velocidad a la cámara de fusión y sobre un “cuerpo central” desde el cual el vidrio fundido fluye a un depósito. Dado que la temperatura de la llama se ve reducida por la presencia de la mezcla en la llama, una ventaja primordial de este sistema es su potencial de bajas emisiones de NOx.

6.8.3. Horno de Fusión de Plasma

El British Glass Research Group está desarrollando actualmente un proceso rápido de fusión que utiliza la conductividad eléctrica del vidrio fundido. El sistema consta de tres antorchas de arco eléctrico posicionadas a 120 °C una de la otra. Estas reciben un suministro de gas argón del alta pureza que es ionizado y expulsado de las boquillas de las antorchas en forma de una llama de plasma de baja energía. Bajo las antorchas está situado un crisol aislante que contiene vidrio fundido. Se alimenta material de mezcla o vidrio recuperado a este baño de fusión desde arriba, mientras se extrae vidrio fundido de forma continua por la base.

El sistema puede funcionar como horno de prefusión o como horno de fusión final. La prefusión de mezcla y casco de vidrio no conductor se consigue cuando se colocan las antorchas muy cerca una de la otra. De este modo circula corriente de un antorcha a la otra a través del chorro de plasma ionizado, y el

calor de convección del gas en dilatación y el calor de radiación del plasma se combinan para formar un baño de vidrio fundido. En el modo de fusión final, las antorchas se recolocan de modo que la corriente de plasma circule de una antorcha a la otra a través del vidrio fundido. La resistencia del vidrio es suficientemente baja a estas temperaturas para permitir este modo de funcionamiento.

El sistema ofrece una serie de ventajas potenciales:

- ✓ La mezcla y el casco de vidrio pueden fundirse en minutos para producir vidrio parcialmente afinado;
- ✓ El horno puede encenderse y apagarse a voluntad;
- ✓ La composición y color del vidrio pueden modificarse muy rápidamente;
- ✓ La operación está virtualmente libre de contaminación; las emisiones de SO_x, NO_x y polvo son despreciables.

Este tipo de fusión podría estar disponible para fusiones de muy bajo volumen en los dos próximos años. No se espera que sea una técnica viable para fundir más de 20 toneladas diarias en un futuro inmediato.

CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES FINALES

Este capítulo detalla las conclusiones y recomendaciones del intercambio de información sobre mejores técnicas disponibles (MTD) en la Industria del Vidrio. No cubre las conclusiones sobre MTD, que se indican en el Capítulo 5.

7.1. Intercambio de Información

El trabajo en este documento comenzó en enero de 1998 con la preparación de documentos que detallaban propuestas sobre el ámbito de trabajo y los aspectos claves. La primera reunión de Grupo de Trabajo Técnico (la reunión “inicial”) tuvo lugar los días 29 y 30 de enero de 1998. Durante esta reunión se alcanzó un acuerdo sobre la estructura del documento, el ámbito del trabajo, y la metodología básica para el intercambio de información. Se determinaron los aspectos medioambientales claves y las prioridades del trabajo, y se realizaron aportaciones por parte de los Estados Miembros y la Industria.

Desde enero a octubre de 1998 se recopiló información para los capítulos 1 a 4 y se elaboró el borrador de los capítulos 1 a 3. Las claves del intercambio de información fueron las visitas a centros y reuniones de los subgrupos del Grupo de Trabajo Técnico (TWG). En noviembre de 1998 se publicó un borrador que cubría los capítulos 1 a 3 para consulta. Durante el periodo de noviembre de 1998 a febrero de 1999 se recopiló más información y se preparó el primer borrador completo del documento, que incorporaba los comentarios a los capítulos 1 a 3. Las consultas sobre este borrador se realizaron durante marzo y abril. Las respuestas a las consultas fueron consideradas por el European IPPC Bureau (EIPPCB) y se publicó un segundo borrador en septiembre de 1999 para su consideración antes de la segunda reunión del TWG.

Se recibió gran cantidad de información facilitada por la mayoría de sectores de la industria y por los Estados Miembros, en particular Holanda, Francia, Alemania, Italia y Austria. La información relativa a los sectores de Fritas y Fibra Cerámica sólo estuvo disponible más adelante en el proyecto y fue en general menos detallada. La mayoría de información sobre Fritas fue facilitada por la industria española.

La información fue validada mediante visitas a centros de producción, consultas con los miembros del TWG y su contraste dentro del EIPPCB. La información fue por lo general de muy alta calidad y se fue afinando a medida que progresó el intercambio de información. No obstante, hay una serie de lagunas en la información, así como áreas en las que sería beneficioso un mayor detalle. Estos aspectos se discuten en la Sección 7.3 siguiente.

La segunda reunión del TWG se celebró del 17 al 19 de noviembre de 1999. Se discutieron detenidamente una serie de detalles, pero particularmente los relativos al Capítulo 5, obteniéndose un buen nivel de consenso. Un pequeño número de temas importantes se discutieron con más detalle en una serie de grupos de trabajo que recibieron el mandato del TWG principal de llegar a un consenso sobre los aspectos restantes del Capítulo 5. Los resultados de estos grupos de trabajo han sido incorporados en el documento revisado y no hay aspectos importantes pendientes en los que el TWG no haya podido alcanzar el consenso.

7.2. Conclusiones Generales

El intercambio de información sobre las mejores técnicas disponibles en la Industria del Vidrio tuvo en general mucho éxito, y se alcanzó un alto grado de consenso tras la segunda reunión del TWG. Se facilitó gran cantidad de información y hubo un alto grado de participación por parte de la mayoría de sectores de la Industria y la mayoría de Estados Miembros. El TWG aportó un foro para que expertos reconocidos pudieran intercambiar opiniones e información y pudieran discutir los distintos aspectos en un ambiente imparcial.

Fue muy evidente desde el inicio de este trabajo que la Industria del Vidrio, según lo descrito en las Secciones 3.3 y 3.4 del Anexo 1 de la Directiva, era extremadamente diversa, tanto en su escala como en

las tecnologías empleadas. Una de las conclusiones más importantes fue que, debido a esta diversidad, con frecuencia es inapropiado especificar técnicas particulares a aplicar como MTD en todos los sectores y procesos. El enfoque general adoptado en este documento es determinar niveles de eficacia que son indicativos del uso de las MTD y luego identificar las técnicas que pueden ser más apropiadas para un sector dado. A lo largo del Capítulo 5 se reconoce que la forma más apropiada de alcanzar estos niveles de eficacia puede variar de un proceso a otro.

En los últimos años se ha avanzado mucho en la mejora de la eficacia medioambiental de la industria. Esta tendencia prosigue y se esperan nuevas mejoras. Como se explica en el Capítulo 6, se prevén mejoras en la eficacia por el desarrollo ulterior de las técnicas primarias y por las técnicas secundarias más convencionales, más que mediante técnicas completamente novedosas.

A medida que aumentan las expectativas y requisitos de eficacia medioambiental, la industria se enfrenta a costes que pueden ser elevados para su cumplimiento. Esto supone un incentivo para que la industria desarrolle métodos más económicos de conseguir estos niveles de eficacia, y la Industria del Vidrio ha tenido bastante éxito afrontando este reto. Las técnicas más económicas suelen ser técnicas primarias, que se centran en la prevención de la emisión de los contaminantes en lugar de en el tratamiento de las sustancias emitidas. Al considerar el impacto global sobre el medio ambiente, las técnicas primarias son preferibles generalmente si pueden conseguir niveles de emisiones equivalentes. Un éxito particular del uso de técnicas primarias, como la oxícombustión, ha sido en el control de las emisiones de NOx. No obstante, para las emisiones de partículas las técnicas primarias no son generalmente capaces de alcanzar niveles de emisiones comparables a los de las técnicas secundarias.

7.3. Recomendaciones para Trabajos Futuros

Como se ha indicado anteriormente, la calidad de la información facilitada fue en general muy alta, pero se identificaron una serie de áreas en las que una mayor información sería útil para refinar la determinación de las MTD. El objetivo de este proyecto era la coordinación y difusión del intercambio de información sobre MTD. No entraba en el ámbito de este trabajo realizar nuevas indagaciones para llenar esta falta de información. No obstante, hay ejemplos en los que el EIPPCB o miembros del TWG han recopilado u obtenido nueva información. Las recomendaciones de las áreas que requieren un trabajo adicional y de las áreas que deben estudiarse con detalle cuando se revise este documento se presentan a continuación.

Sería útil realizar un mayor trabajo para facilitar un mayor comprensión de los aspectos de efectos sobre otros medios. En particular, sería conveniente desarrollar una metodología para evaluar los efectos relativos sobre el medio ambiente en su conjunto de las emisiones a los distintos medios. Por ejemplo, una consideración primordial para algunas instalaciones es el posible conflicto de prioridades para la minimización de residuos y la reducción de las emisiones de SO₂ a la atmósfera, en plantas en las que podría usarse lavado seco o semiseco pero que tienen un escaso potencial de reciclaje interno del material recogido.

Igualmente importante sería una metodología para evaluar los efectos relativos de las emisiones de distintas sustancias al mismo medio. Por ejemplo, la conversión de combustión a fuel-oil a combustión a gas reduce las emisiones de SO₂ pero puede en muchos casos producir emisiones de NOx ligeramente superiores y un mayor consumo de combustible. También existe la posibilidad de que, al reducir los niveles de exceso de oxígeno para reducir la formación de NOx, el estado redox del vidrio pueda quedar alterado, produciendo emisiones más elevadas de SO₂.

Una complicación adicional en la determinación de las MTD puede ser la evaluación del impacto medioambiental de las actividades externas. Por ejemplo, la fusión eléctrica reduce sustancialmente las emisiones del horno. Sin embargo, sería conveniente una evaluación del impacto medioambiental de la producción y distribución de electricidad en relación con la reducción de las emisiones, con el fin de determinar la opción que proporciona la mejor protección para el medio ambiente en su conjunto.

También sería conveniente una consideración más detallada de los costes económicos de las distin-

tas técnicas al efectuar la revisión de este documento. La mayor parte de la información económica que se facilita en el Capítulo 4 es más orientativa que precisa. Esto es inevitable debido a las variaciones en las instalaciones consideradas, la sensibilidad comercial de la información económica, y en muchos casos el número muy limitado de ejemplos disponibles. El Profesor Beerkens de TNO preparó un informe para el EIPPCB [tm32 Beerkens] resumiendo la información disponible, y gran parte de los datos económicos se basan en este informe. Una posible mejora sería utilizar una serie de estudios de casos para comparar el coste y la eficacia de diversas opciones en una instalación determinada. Esto podría ayudar a sobrelevar algunas de las dificultades de comparación de costes en distintas instalaciones, pero requeriría información que no se halla disponible actualmente.

Sería útil un trabajo adicional en la evaluación de las técnicas a considerar en la determinación de las MTD para emisiones al medio acuático y para el consumo de energía. Debido a limitaciones de recursos y tiempo, estos aspectos no se consideraron con tanto detalle como otros aspectos del BREF.

Algunas de las técnicas discutidas en este documento se hallaban en fase de desarrollo, y se espera disponer de mayor información en los próximos años. Toda revisión de este trabajo deberá tener en consideración este desarrollo y el modo en que la información adicional modifica las conclusiones de este documento.

La aplicación de oxícombustión está en una etapa relativamente temprana, y aunque muchos de los aspectos técnicos han sido resueltos, hay todavía algunos aspectos que pueden sólo evaluarse con información obtenida del uso a largo plazo de la técnica. En particular, con una mayor experiencia operativa debe poder valorarse el efecto de la oxícombustión sobre la vida de los refractarios. Esto es importante para la viabilidad económica de la técnica en algunos sectores y en la actualidad representa un elemento de riesgo financiero, que hace que algunas empresas no se decidan a aplicar la técnica. Asimismo, los costes directos de la técnica deberían reevaluarse, en particular con respecto al balance entre el ahorro de energía y el coste del oxígeno. Esto puede ser un aspecto crítico en el atractivo económico de la técnica, y la situación actual en toda Europa es muy variada.

Hay también una serie de otras técnicas en las que algunos aspectos no han sido probados o son rebatidos para la industria en su conjunto o para determinadas aplicaciones. Por ejemplo, las técnicas de SCR, SNCR, Recombustión y precalentamiento de mezcla/casco de vidrio. Los desarrollos en estas áreas deberían también revisarse a la luz de una mayor experiencia operativa.

Para los sectores de Vidrio Doméstico y Fibra de Vidrio de Filamentos Continuos resultó difícil llegar a conclusiones firmes sobre las MTD para emisiones de NOx. Cuando se revise este documento, deberá revisarse la posición en estos sectores y el progreso con las técnicas sugeridas.

Se recomienda revisar este documento en un plazo de 4 años.

CAPÍTULO 8. ANEXO I: DATOS DE EMISIONES DE INSTALACIONES DE EJEMPLO

Esta información se presenta para complementar la información facilitada en el Capítulo 3. Estas plantas son ejemplos reales y los datos representan las emisiones reales medidas. La mayoría de los datos hacen referencia a 1997. Estos ejemplos se presentan como ejemplos representativos o típicos de la UE, aunque no se presentan como indicativos de las MTD. La mayoría de los hornos de combustible fósil tienen posibilidad de refuerzo eléctrico.

8.1. Sector de Vidrio para Envases

Los datos presentados son generalmente para un solo horno en cada instalación. La mayoría de instalaciones de vidrio para envases tienen 2 o más hornos. Los sistemas de eliminación son por lo general comunes a más de un horno; en este caso (Ej. CG6) los datos de emisiones son también comunes a otros hornos.

Horno	Tipo de horno	Combustible	Capacidad (t./día)	Vidrio de Desecho (%)	Técnicas de Eliminación/Comentarios
VR 1	Regenerativo llama transversal	Gas	370	72	Precalentador de casco de vidrio/mezcla, medidas primarias de NOx, precipitador electrostático
VR 2	Regenerativo llama transversal	Gas	370	28	
VR 3	Regenerativo llama transversal	Fuel-oil	400	50	Quemadores de bajo NOx Previsto cambio a fuel-oil, bajo en azufre
VR 4	Regenerativo llama de bucle	Fuel-oil	70	41	Cristal de roca de alta calidad para perfumería
VR 5	Regenerativo llama de bucle	Gas	244	10	Cambio reciente a combustión a gas natural
VR 6	Regenerativo llama de bucle	Fuel-oil	300	80	Columna de adsorción de gases ácidos, precipitador electrostático, caldera de recuperación (sistema común a otro horno)
VR 7	Unidad fundidora con oxicombustión	Gas	80	38	Vidrio de borosilicato para farmacia Sin sulfato en la mezcla Precipitador electrostático
VR 8	Recuperación	Gas	400	Se desconoce	Medidas primarias – quemadores de bajo NOx
VR 9	Unidad fundidora con oxicombustión	Gas	350	65	Filtro de mangas y caldera de recuperación
VR 10	Unidad fundidora con oxicombustión	Gas	310	84	Precalentador indirecto de casco de vidrio, filtro de mangas y caldera de recuperación

Horno	Energía de Fusión (GJ/t.)	Polvo mg/Nm ³ (kg/t.)	NOx como NO ₂ mg/Nm ³ (kg/t.)	SOx como SO ₂ mg/Nm ³ (kg/t.)	HCl mg/Nm ³ (kg/t.)	HF mg/Nm ³ (kg/t.)
VE 1	3,49	24 (0,032)	708 (0,955)	402 (0,542)	7,2 (0,010)	ND
VE 2	4,12	127 (0,22)	772 (1,31)	645 (1,10)	NM	NM
VE 3	4,54	169 (0,29)	1.080 (1,9)	2.640 (4,3)	62 (0,106)	1 (0,002)
VE 4	7,16	175 (0,56)	700 (2,2)	950 (3,0)	NM	NM
VE 5	5,35	160 (0,28)	1.528 (2,7)	198 (0,4)	25 (0,045)	2 (0,004)
VE 6	3,94	3 (0,005)	800 (1,25)	1.300 (2,04)	11 (0,017)	0,3 (0,0005)
VE 7	5,98	< 5 (< 0,005)	2.158 (0,61)	ND	NM	NM
VE 8	5,22	100 (0,22)	360 (0,8)	810 (1,8)	NM	NM
VE 9	3,35	NM	(0,7)	(0,8)	NM	NM
VE 10	3,35	(0,0006)	(0,5)	(0,6)	(0,013)	(0,0007)

ND = < límite de detección

NM = no medido

8.2. Sector de Vidrio Plano

Estas plantas tienen todas hornos de vidrio flotado.

Horno	Tipo de Horno	Combustible	Capacidad (t./día)	Técnicas de Eliminación/Comentarios
VP 1	Regenerativo llama transversal	Fuel-oil (<2% S)	600	NOx 1º (FENIX), datos de 1998. Caldera de recuperación
VP 2	Regenerativo llama transversal	Fuel-oil (2,3 %S)	450	NOx 1º Reducción a fuel-oil con 2,4 % de S
VP 3	Regenerativo llama transversal	Gas o fuel-oil (1 %S)	650	NOx 1º, PE + lavador seco con reciclaje de polvo al 100% Caldera de recuperación
VP 4	Regenerativo llama transversal	Gas	600	Controles 1º
VP 5	Regenerativo llama transversal	Gas	810	NOx 1º y 3R (sólo 2/6 tomas con 3R), PE + lavador seco con reciclaje de polvo al 100% Caldera de recuperación
VP 6	Regenerativo llama transversal	Gas	500	RCS, PE + lavador seco con reciclaje de polvo al 100%
VP 7	Regenerativo llama transversal	50:50 Gas y fuel-oil	550	Filtro de mangas con lavado seco (carbonato sódico)

Horno	Energía de Fusión (GJ/t.)	Polvo mg/Nm ³ (kg/t.)	NOx como NO ₂ mg/Nm ³ (kg/t.)	SOx como SO ₂ mg/Nm ³ (kg/t.)	HCl mg/Nm ³ (kg/t.)	HF mg/Nm ³ (kg/t.)
VP 1	5,4	196 (0,43)	510 (1,1)	3.381 (7,57)	39 (0,087)	4,8 (0,011)
VP 2	7,74	213 (0,68)	1.473 (4,22)	2.400 (6,87)	19 (0,062)	0,06 (0,0002)
VP 3	6,16	15 (0,04) promedio	1.300 (2,7) promedio	830 (2,1)	30 (0,082)	4 (0,011)
VP 4		156 (0,41)	2.578 (6,82)	748 (1,98)	<10 (<0,03)	<1 (<0,003)
VP 5		11 (0,024) promedio	1.294 (2,94) ⁽¹⁾ promedio	545 (1,24) promedio	9 (0,02) promedio	0,4 (0,0008) promedio
VP 6	6,14	<10 (0,02)	495 (1,12)	295 (0,67)	<5	<1
VP 7	NM	<10 (<0,03)	2.200 [*] (6)	200 (0,56)	<30 (<0,08)	<5 (<0,02)

(1) El sistema 3R sólo estaba operativo en 2 de los 6 pórticos. Si todos los pórticos hubiesen trabajado con 3R, el nivel de emisión habría sido <500 mg/Nm³ y < 1.0 kg/tonelada de vidrio fundido.

8.3. Sector de Fibra de Vidrio de Filamentos Continuos

Horno	Tipo de Horno	Combustible	Capacidad (t./día)	Técnicas de Eliminación/Comentarios
FV 1	Recuperación de llama transversal	Gas	>40	Sin eliminación 2 ^a , mezcla de flúor añadida.
FV 2	Recuperación de llama transversal	Gas	>40	Sin eliminación 2 ^a , “reducción” de la mezcla de flúor añadida.
FV 3	Recuperación de llama transversal	Gas	>40	Sin eliminación 2 ^a , sin mezcla de flúor añadida.
FV 4	Recuperación de llama transversal	Gas	>75	NOx 1º, lavador húmedo con reactivos alcalinos, sin mezcla de fluoruro añadida.
FV 5	Recuperación de llama transversal	Gas	>40	Sin eliminación 2 ^a , nueva técnica patentada sin adición de flúor o boro.
FV 6	Recuperación de llama transversal	Gas	>55	NOx 1º, PE, sin adición de flúor.
FV 7	Recuperación de llama transversal	Gas	>75	Sin eliminación 2 ^a , mezcla de flúor añadida.
FV 8	Recuperación de llama transversal	Gas	50	PE/Filtro de mangas con inyección de caliza

Horno	Energía de Fusión (GJ/t.)	Polvo mg/Nm ³ (kg/t.)	NOx como NO ₂ mg/Nm ³ (kg/t.)	SOx como SO ₂ mg/Nm ³ (kg/t.)	HCl mg/Nm ³ (kg/t.)	HF mg/Nm ³ (kg/t.)
FV 1	14,9	158 (1,22)	1.009 (7,8)	136 (1,31)	3 (0,03)	123 (0,94)
FV 2	18,2	218 (1,23)	968 (5,5)	133 (0,85)	3 (0,02)	93 (0,53)
FV 3	13	300 (1,2)	1.140 (4,6)	56 (0,22)	4 (0,02)	17 (0,07)
FV 4	10,5	20 (0,22)	1.100 (12,44)	270 (1,85)	0	0
FV 5	18,2	13 (0,05)	1.070 (3,9)	135 (0,5)	5 (0,02)	21 (0,08)
FV 6	8,75	9,5 (0,04)	1.350 (6,8)			
FV 7		294 (1,6)	672 (3,52)			258 (1,42)
FV 8	16,2	4,1 (0,02)	1.020 (5,0)	620 (3,0)		1,0 (0,0005)

8.4. Sector de Vidrio Doméstico

Horno	Tipo de Horno	Combustible	Capacidad (t./día)	Técnicas de Eliminación/Comentarios
VD 1	Regenerativo de llama de bucle	Principalmente gas, puede usarse fuel-oil	165	1º NOx
VD 2	Regenerativo de llama de bucle	Gas	65	1º NOx
VD 3	Recuperación mixta	Gas y electricidad	30	Filtro de mangas
VD 4	Fusión eléctrica	Electricidad	28	Filtro de mangas
VD 5	Regenerativo de llama de bucle Vidrio sodocálcico ultrablanco	Gas	165	Control 1º NOx, datos de 1998
VD 6	100 % Eléctrico Vidrio opalino	Electricidad	65	Fusión eléctrica con parte superior fría, con filtro de mangas y formulación optimizada de la mezcla
VD 7	100 % Eléctrico Cristal	Electricidad	32	Cristal sin plomo, 35 % casco de vidrio
VD 8	100 % Eléctrico Vidrio sodocálcico ultra blanco	Electricidad	48	Lavador húmedo, 40 % casco de vidrio
VD 9	Recuperativo	Gas	34	PE

Horno	Energía de Fusión (GJ/t.)	Polvo mg/Nm ³ (kg/t.)	NOx como NO ₂ mg/Nm ³ (kg/t.)	SOx como SO ₂ mg/Nm ³ (kg/t.)	HCl mg/Nm ³ (kg/t.)	HF mg/Nm ³ (kg/t.)
VD 1	4,8	109 (0,23)	2314 (4,9)	186 (0,58)		
VD 2	6,5	171 (0,7)	2087 (8,7)	3,1 (0,01)		
VD 3	9,5	<1,0 <td>1400 (3,5)</td> <td></td> <td></td> <td></td>	1400 (3,5)			
VD 4	4,1	0,6 <td></td> <td></td> <td></td> <td></td>				
VD 5	4,96	108 (0,25)	1243 (2,9)	126 (0,29)		
VD 6	3,42	(0,02)	(1,0)	(0,02)		(0,001)
VD 7	3,8	1,7 (0,035)	11 (0,23)	0,36 (0,007)	0,42 (0,008)	0,05 (0,001)
VD 8	3,7	2,3 (0,02)	117 (1,07)	1,3 (0,011)	1,0 (0,009)	0,15 (0,0014)
VD 9		<1,0				

8.5. Sector Vidrio Especial

Horno	Tipo de Horno	Combustible	Capacidad (t./día)	Técnicas de Eliminación/Comentarios
VE 1	Regenerativo de llama transversal para vidrio panel de tubo de TV	Gas o fuel-oil	230	PE y SCR
VE 2	Regenerativo de llama transversal para vidrio de embudo de TV	Gas o fuel-oil	180	Filtro de mangas
VE 3	Regenerativo de llama transversal para vidrio al Borosilicato	Gas hasta 40 % fuel-oil ligero	50	Afino sin sulfatos, PE con inyección de cal, SCR
VE 4	100 % Eléctrico para vidrio al Borosilicato	Electricidad	40	Horno de fusión con parte superior fría, afino con nitrato, filtro de mangas. Datos de 1998.
VE 5	Regenerativo para vidrio al Borosilicato de iluminación	Gas	34	Las emisiones de estos dos hornos se combinan y se tratan en un PE y SNCR de 4 fases. Se aplican también controles 1º NOx a SG 6.
VE 6	Regenerativo para vidrio sodocálcico para iluminación	Gas	150	
VE 7	Regenerativo de llama transversal para vidrio Soluble	Gas y fuel-oil 50:50	320	PE y SNCR
VE 8	Regenerativo de llama transversal para vidrio panel de tubo de TV	Gas	220	PE y SCR
VE 9	Oxi-gas de llama transversal para vidrio de panel y embudo de tubo de TV	Gas	420	PE y combustión de oxi-gas
VE 10	Oxi-gas de llama transversal para vidrio de embudo de tubo de TV	Gas	280	PE, combustión de oxi-gas y SNCR

Horno	Energía de Fusión (GJ/t.)	Polvo mg/Nm ³ (kg/t.)	NOx como NO ₂ mg/Nm ³ (kg/t.)	SOx como SO ₂ mg/Nm ³ (kg/t.)	HCl mg/Nm ³ (kg/t.)	HF mg/Nm ³ (kg/t.)
VE 1	7,7	10 (0,033)	800 (2,7)	70 (0,082)	1 (0,003)	0,6 (0,001)
VE 2	5,8	3 (0,006)	4.300 (12)	50 (0,07)	2 (0,009)	0,3 (0,001)
VE 3	17,0	45 (0,47)	900 (9,44)	<1 (<0,01)	1 (0,01)	4,5 (0,05)
VE 4	7,99	10 (0,06)	85 (0,54)	<1 (<0,01)	10 (0,06)	0,5 (0,003)
VE 5	9,55	5	800	50	8	2
VE 6	6,01	(0,02)	(3,33)	(0,2)	(0,03)	(0,01)
VE 7	1.020	10 (0,016)	500 (0,8)	350 - 500 (0,56 - 0,8)	15 (0,02)	-
VE 8	1.400 – 1.800	<<15 (<<0,06)	360 (1,5)	<10 (<0,04)	<<30 (<<0,1)	<<5 (<<0,02)
VE 9	1.556 Panel 19 % O ₂	1 (0,003)	1.800 (5)	2 (0,005)	0,4 (0,001)	0,4 (0,001)
VE 10	1.389 Embudo 20 % O ₂	1388 (0,004)	510 (2,08)	3,2 (0,014)	1,6 (0,007)	0,4 (0,002)

8.6. Sector Lana Mineral

La mayoría de las operaciones de formación y polimerización con lana de vidrio disponen de chorros de impacto y ciclones además de las medidas primarias y las técnicas de eliminación descritas.

Horno	Tipo de Horno	Combustible	Capacidad (t./día)	Técnicas de Eliminación/ Comentarios
LV 1	Cuba de oxicombustión	Oxi-gas	82 - 165	PE y oxi-gas para fusión. Lavador húmedo para enfriamiento.
LV 2	Horno de fusión eléctrico	Electricidad	165 - 274	Filtro de mangas con reciclaje de polvo en el horno. Lavadores húmedos en moldeo y polimerización. El horno utiliza >70 % de casco de vidrio externo.
LV 3	Horno de fusión eléctrico	Electricidad	165 - 274	PE en horno, lavador Venturi en polimerización. Sin casco de vidrio externo.
LV 4	Recuperación (llama de bucle)	Gas	27 - 82	Lavador Venturi en polimerización.
LV 5	Recuperación	Gas	82 - 165	PE en horno, PE húmedo en moldeo y polimerización.

Horno	Partículas mg/Nm ³ (kg/t.)	NOx como NO ₂ mg/Nm ³ (kg/t.)	SOx como SO ₂ mg/Nm ³ (kg/t.)	HCl mg/Nm ³ (kg/t.)	HF mg/Nm ³ (kg/t.)	Fenol mg/Nm ³ (kg/t.)	Formaldehído mg/Nm ³ (kg/t.)	Amoniaco mg/Nm ³ (kg/t.)
LV 1 Fusión Moldeo/ Polimerización	7,5 (0,004) 15,7 (0,078)	102 (0,63)	18 (0,035)	1,2(0,002)	0,2(0,0003)	2,1(0,164)	2 (0,141)	28 (2,16)
LV 2 Fusión Moldeo/ Polimerización	1 (0,002) 25 (1,5)	30 (2,0)				12 (0,3)	2 (0,1)	60 (3,5)
LV 3 Fusión Moldeo/ Polimerización	5 (0,02) 41 (2,61)	59 (0,14)			0,01	5,3 (0,34)		87 (5,56)
LV 4 Fusión Moldeo/ Polimerización	1.065 (7,51) 2.548 (50)	704 (4,96)	1,5 (0,01)	70 (0,49)	0,8(0,005)	761 (21,7)	89 (1,75)	3046 (68)
LV 5 Fusión Moldeo/ Polimerización	293 (0,373)	1.706 (6,5) 371 (7,7)	0,9(0,004)	19 (0,081)	1 (0,005)	16 (1,114)	4,3(0,306)	43 (3,116)

Horno	Tipo de Horno	Combustible	Capacidad (t./día)	Técnicas de Eliminación/ Comentarios
LR 1	Cuba	Gas natural	82 - 165	PE con reciclaje del polvo en horno PE húmedo en formado y polimerización.
LR 2	Cuba	Electricidad		Incinerador y bolsa de filtro en horno. Filtro de lana de roca en formado e incinerador en polimerización.
LR 3	Viento caliente	Coque		Ciclón en horno, filtro de lana de roca en formado y polimerización combinado.
LR 4	Viento caliente	Coque	>165	Incinerador, filtro de mangas y lavador seco en horno. Filtro en formado e incinerador en polimerización.
LR 5	Viento caliente	Coque	82 - 165	Incinerador y filtro de mangas en horno. Filtro de lana de roca en formado e incinerador en polimerización.
LR 6	Viento caliente	Coque	82 - 165	Incinerador y filtro de mangas en horno. Filtro de lana de roca en formado e incinerador en polimerización. Escoria en mezcla.

Horno	Partículas mg/Nm ³ (kg/t.)	NOx como NO ₂ mg/Nm ³ (kg/t.)	SOx como SO ₂ mg/Nm ³ (kg/t.)	HCl mg/Nm ³ (kg/t.)	HF mg/Nm ³ (kg/t.)	Fenol mg/Nm ³ (kg/t.)	Formaldehido mg/Nm ³ (kg/t.)	Amoniaco mg/Nm ³ (kg/t.)
LR 1 Fusión Moldeo/ Polimerización	30 (0,1)	1210 (2,9)	165 (0,3)	1 (0,002)	0,4(0,001)		28 (6,9)	14(0,4)
LR 2 Fusión Moldeo Polimerización	10 (0,002) 10 (0,3)	150 (0,03) 30 (0,15)	3.000 (0,6)			30 (0,9) 0,2(0,002)	3 (0,1) 0,4(0,002)	60 (1,8) 20 (0,1)
LR 3 Fusión Moldeo/ Polimerización	2.600 (3,6) 12 (0,4)	300 (0,45) 4 (0,16)	930 (1,4) 2 (0,07)	H ₂ S 300 (0,4)		30 (1,1)	3 (0,1)	18 (0,7)
LR 4 Fusión Moldeo Polimerización	6 (0,02) 19,5 (0,5)	159 (0,5)	385 (1,4)	15 (0,05)	2 (0,01)	18 (0,4) 7 (0,01)	7 (0,15) 7 (0,01)	55 (1,3) 45 (0,1)
LR 5 Fusión Moldeo Polimerización	12,7 (0,02) 14,4(0,33) 13,2 (0,02)	169 (0,23) 89 (0,14)	1046 (1,4)		1 (0,001)	5 (0,11) 1 (0,002)	2 (0,05) 1 (0,002)	60 (1,4) 90 (0,15)
LR 6 Fusión Moldeo Polimerización	57 (0,1) 44,5 (0,8) 14 (0,04)	175 (0,32)	1951 (3,6)	1,9(0,003)	1,1(0,002)	3,3 (0,06) 0,9(0,002)	10,9 (0,2) 2,8(0,005)	43 (0,78) 172 (0,31)

CAPÍTULO 9. ANEXO II: EJEMPLO DE BALANCES DE AZUFRE PARA HORNO DE VIDRIO INDUSTRIALES

Los capítulos 4 y 5 hacen referencia al uso de los balances de azufre en la determinación de las condiciones específicas de la instalación, o como base de comparaciones entre varias opciones de proceso. Este anexo proporciona dos ejemplos de balances de azufre y explica los temas relacionados para estos ejemplos. Los ejemplos escogidos son hornos de vidrio sodocálcico (1 vidrio plano, 1 vidrio para envase) con reciclaje interno completo y parcial de polvo recogido por una unidad de filtro que incorpora lavado de gases ácidos. Las cifras usadas sólo son ejemplos, y en particular los niveles de emisiones señalados en los ejemplos no son indicativos de las MTD.

El reciclaje total de polvo de filtro depende del tipo de vidrio, su estado de oxidación, su capacidad de absorber SO₃ y de forma más generalizada de las condiciones de funcionamiento del horno (especialmente del contenido de azufre en el combustible). La mejor forma de ilustrar estos aspectos es examinando un balance completo de azufre como en las figuras siguientes. Para un caso específico, el caudal puede indicarse en kg/h de una unidad coherente (SO₂, SO₃, o S) o alternativamente como mg/Nm³ de SO₂, dado que para un horno en particular es sencillo calcular el factor de conversión entre la concentración y el flujo de masa.

Para el balance de azufre del horno, las entradas son:

- ✓ Entrada de azufre por material de la mezcla
- ✓ Entrada de azufre por material recuperado (interno + externo)
- ✓ Entrada de azufre por el combustible
- ✓ Entrada de azufre por polvo de filtro reciclado

Las salidas son:

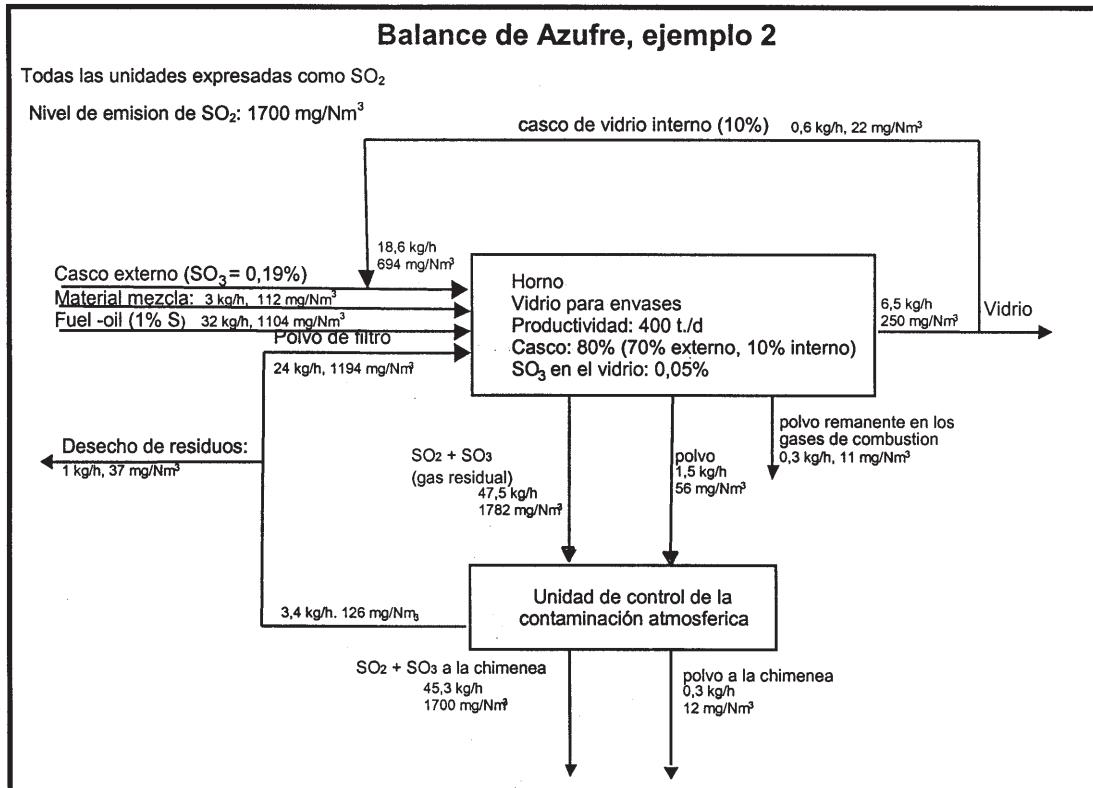
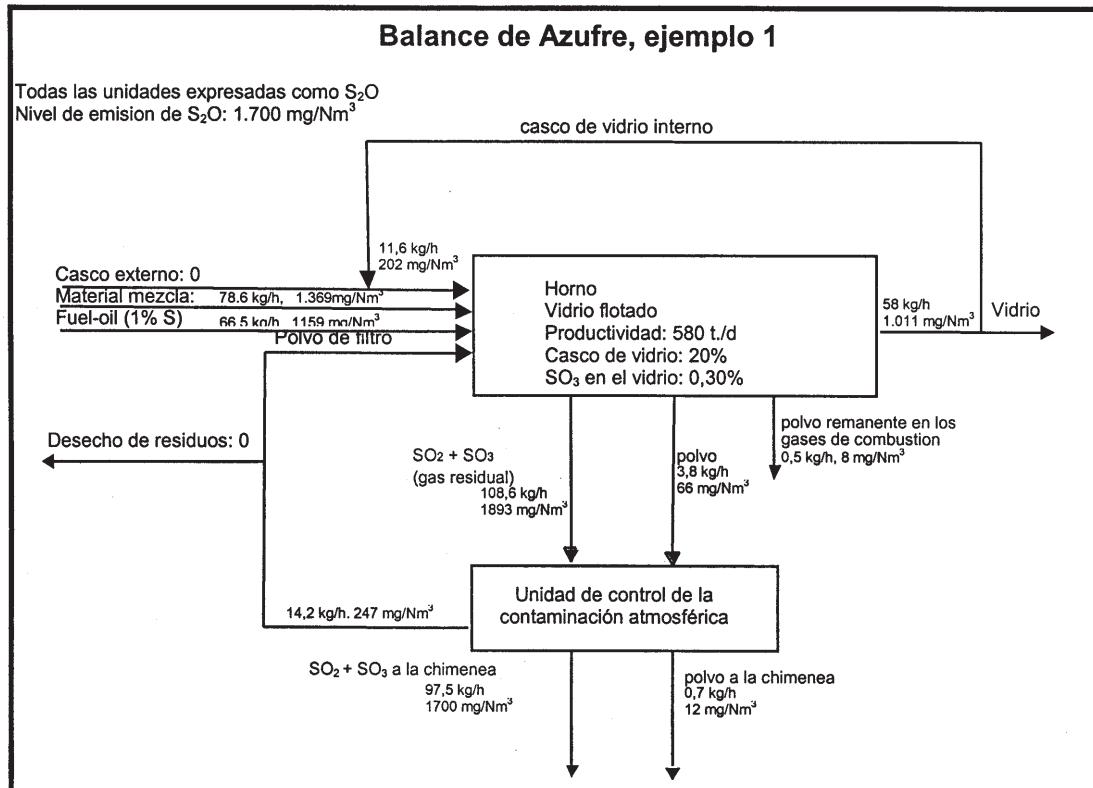
- ✓ Azufre en el vidrio
- ✓ Azufre en el gas de combustión (SO₂ + SO₃)
- ✓ Azufre contenido en el polvo
- ✓ Azufre en el polvo depositado en regeneradores y gases de combustión (estimado en 1 a 5 %)

El balance total de azufre debe incluir el balance de azufre para la unidad de control de contaminación, es decir las salidas en la chimenea y en el polvo de filtro. Si la cantidad de polvo de filtro no es compatible con el tipo de vidrio, se utilizará una vía de desecho externa (generalmente vertedero), al menos para parte del polvo. Alternativamente y para minimizar el desecho de residuos, el contenido de azufre del combustible puede ser reducido. Generalmente, esta última opción es la preferida por lo que respecta a protección global del medio ambiente y por motivos económicos.

El reciclaje de polvo de filtro implica la sustitución del sulfato sódico o del yeso en el material de la mezcla. La cantidad potencial de polvo que se puede reciclar depende de la cantidad de sulfato necesaria para refinar y de la posibilidad de sustituir dicho sulfato por polvo de filtro. Las propiedades del polvo y el potencial de reciclaje dependerán de las condiciones de funcionamiento y del tipo de absorbente (material de lavado) utilizado. El reciclaje es generalmente más difícil con inyección de cal dado que la eficacia de la eliminación es inferior y el polvo está menos oxidado. En general, el polvo obtenido del lavado con carbonato sódico o bicarbonato sódico es más fácil de manejar y de reciclar.

El vidrio recuperado externo y su composición media influirá también la entrada de SO₃. Si el horno

es con combustión de fuel-oil, el combustible originará aproximadamente 1200 mg/Nm³ de SO₂ por cada 1 % de azufre en el fuel-oil. La cantidad de azufre que puede absorber el vidrio varía de prácticamente cero para algunos vidrios reducidos, hasta unos 500 a 700 mg/Nm³ para vidrios al sílex oxidantes. Estas cifras sólo son a título indicativo.



CAPÍTULO 10. ANEXO III: MEDICIÓN DE EMISIONES

Este anexo ofrece unas recomendaciones generales para medir las emisiones de los procesos de producción del vidrio, y así obtener unos resultados representativos y comparativos. Pueden aplicarse una serie de métodos y procedimientos nacionales e internacionales para la medición de emisiones, aunque su uso puede dar resultados muy distintos por la aplicación inadecuada de métodos generales a un caso muy específico como es el del proceso de fabricación de vidrio.

10.1 Principales Contaminantes

La principal fuente de contaminación de la Industria del Vidrio son las emisiones a la atmósfera del proceso de fusión. Sin embargo, en algunos sectores los procesos de acabado pueden también producir emisiones importantes. La siguiente Tabla ofrece un resumen de los principales contaminantes, indicados para los sectores identificados en la Industria del Vidrio:

Sector / Actividad	Contaminantes
Vidrio para Envases	
Manipulación de Materias primas	Polvo, sílice cristalina
Proceso de fusión	Polvo, CO, NOx, SOx, HF, HCl, metales pesados
Aplicación de capas o tratamiento en caliente	Polvo, estaño orgánico e inorgánico, HCl, SOx
Vidrio Plano	
Manipulación de Materias primas	Polvo, sílice cristalina
Proceso de fusión	Polvo, CO, NOx, SOx, HF, HCl, metales pesados (para vidrios coloreados)
Tratamiento superficial	SOx
Fibra Vidrio Filamentos Cont.	
Manipulación de Materias primas	Polvo, sílice cristalina
Proceso de fusión	Polvo, CO, NOx, SOx, HF, HCl, compuestos gaseosos de boro
Procesos de acabado	Polvo, COV, formaldehído, amoniaco, agua residual
Vidrio Doméstico	
Manipulación de Materias primas	Polvo, sílice cristalina, metales pesados
Proceso de fusión	Polvo, CO, NOx, SOx, HF, HCl, metales pesados
Procesos de acabado	HF, agua residual (del pulido y esmerilado)
Vidrio Especial	
Manipulación de Materias primas	Polvo, sílice cristalina, metales pesados
Proceso de fusión	Polvo, CO, NOx, SOx, HF, HCl, metales pesados, compuestos de boro
Procesos de acabado	Polvo, agua residual (del pulido y esmerilado)
Lana Mineral	
Manipulación de Materias primas	Polvo, sílice cristalina
Proceso de fusión	Polvo, CO, NOx, SOx, HF, HCl, compuestos gaseosos de boro, H ₂ S
Procesos de acabado	Polvo, COV, fenoles, aminas, amoniaco, formaldehído, COV, NOx (polimerización), agua residual
Fibra Cerámica	
Manipulación de Materias primas	Polvo, sílice cristalina
Proceso de fusión	Polvo, CO, NOx, SOx, H ₂ S, HF, HCl
Procesos de acabado	Polvo, fibras, agua residual
Fritas	
Manipulación de Materias primas	Polvo, sílice cristalina, metales pesados
Proceso de fusión	Polvo, CO, NOx, SOx, HF, HCl, metales pesados, compuestos de boro
Procesos de acabado	Polvo, agua residual

Tabla 10.1: Principales contaminantes cuya medición debe considerarse en la Industria del Vidrio

10.2. Control de Emisiones

El control de emisiones se utiliza universalmente para asegurar que se cumple con los límites de emisiones permitidos. El modo y la frecuencia deben estar en función de las emisiones a medir y de la tec-

nología de medición empleada. Los métodos que se aplican más frecuentemente son los siguientes:

- Control de la eficacia de las técnicas de eliminación (Ej. caída de presión del filtro de mangas)
- Medición continua de contaminantes
- Medición discontinua de contaminantes
- Cálculo del balance de masa.

Control de la eficacia de las técnicas de eliminación

Por lo general, se trata del requisito mínimo impuesto para el control de emisiones. En algunos casos, (Ej. una situación de emisión claramente estable) la evaluación de la eficacia de la técnica de eliminación podría ser suficiente para determinar el cumplimiento de los requisitos de un permiso. En muchos casos, se aplican técnicas automáticas capaces de detectar el fallo o funcionamiento incorrecto del equipo de eliminación (Ej. medición de la caída de presión, de la temperatura, del pH, etc.).

Medición continua y/o discontinua de contaminantes

El control de emisiones requiere la determinación de todos los parámetros relevantes que pueden influir en la medición de los distintos contaminantes, o en la interpretación y presentación de resultados. Además de las sustancias reguladas (Polvo, NOx, SOx, HCl, HF, etc.), es necesario determinar los parámetros típicos de la fuente de emisión, p. Ej.:

- Velocidad de los gases de combustión y flujo de masa
- Temperatura
- Humedad
- Concentración de oxígeno
- Concentración de dióxido de carbono
- Concentración de monóxido de carbono

La medición de emisiones puede verse afectada por varios factores, algunos de los cuales son especialmente importantes en el caso de los procesos de fusión del vidrio. En la mayoría de los casos, pueden identificarse los parámetros críticos de la manera siguiente:

- Temperatura del gas residual
- Distribución por tamaño del polvo
- Velocidad del gas residual
- Humedad del gas residual
- Contaminantes en forma de gases y partículas
- Tiempo de muestreo
- Condiciones de referencia

Temperatura de gases residuales

La temperatura de los gases de combustión del horno puede variar considerablemente (en general de 100 a 850 °C en la chimenea), dependiendo del sistema de recuperación de calor (regeneradores, recu-

peradores o enfriamiento de los gases) y la técnica de eliminación utilizada. Generalmente, las temperaturas más altas corresponden a hornos de recuperación o de fusión con oxicombustión. Las temperaturas más bajas son características de los gases muy diluidos (hornos discontinuos, fusión eléctrica 100 %, algunos hornos con equipos de eliminación, etc.). Los posibles errores de medición debidos a la temperatura del gas residual pueden ser minimizados por:

- El uso de filtros adecuados y sondas para medir el polvo (filtros de fibra de vidrio o cuarzo sin aglomerantes orgánicos, juntas de alta temperatura, etc.).
- El acondicionamiento adecuado de los filtros antes de su uso a altas temperaturas. Se recomienda un acondicionamiento previo con temperaturas de 400 - 600 °C para prevenir más pérdidas de peso durante las mediciones.
- El uso de sondas calientes y filtros de gas residual a baja temperatura, especialmente en presencia de altos niveles de humedad, para prevenir la condensación de ácidos y de agua.

Distribución del polvo por tamaños

El diámetro de partícula del polvo que genera el proceso de fusión es generalmente muy pequeño (inferior a 1 mm, y generalmente 0,02 – 0,5mm). Durante el muestreo, se aglomeran fácilmente las partículas y, cuando se usan materiales de filtrado alcalinos, tienden a reaccionar con las sustancias gaseosas ácidas presente en el gas de combustión. Para evitar este fenómeno, deberán seleccionarse filtros químicamente inertes para el muestreo. Si se miden las partículas continuamente, pueden resultar difíciles de eliminar las partículas finas de las partes ópticas del equipo de medición, lo que lleva a unos resultados erróneos de concentración de polvo. Deberá usarse un sistema de limpieza adecuado.

Velocidad del gas residual

Aunque el polvo emitido por el proceso de fusión de vidrio se compone de partículas extremadamente finas, las mediciones deberán realizarse isocinéticamente. Deberá seleccionarse la geometría del conducto y la posición del punto de muestreo para permitir una medición correcta de la velocidad de los gases de combustión.

Humedad del gas residual

Es muy corriente la presencia de altos porcentajes de agua en los gases residuales en el caso de los hornos de fusión con oxicombustión y aire-gas, al usar agua como refrigerante antes del equipo de eliminación. Deberá llevarse a cabo la determinación del punto de rocío del gas para evitar la condensación durante el muestreo. Los contaminantes gaseosos deben ser medidos mediante sondas calientes cuando exista algún riesgo de condensación, especialmente en los gases de combustión con alto contenido de SO₃. Este es también el caso para algunos procesos de acabado que usan lavadores húmedos, como en el caso de filamentos continuos, fibra de vidrio, etc. Cuando existe condensación de agua, el líquido resultante deberá ser comprobado para determinar la posible absorción de contaminantes gaseosos, como son los óxidos de azufre.

Contaminantes gaseosos y en forma de partículas

Pueden emitirse algunos contaminantes a la atmósfera en forma de partículas así como de gases. Este es el caso para algunas de las sustancias del proceso de fusión, tal como algunos compuestos del boro (especialmente el ácido bórico), selenio, arsénico, mercurio (si se usa vidrio recuperado de la iluminación), así como el cloruro de estaño de las actividades de aplicación de capas en caliente de vidrio para envases. El ácido bórico se emite a la atmósfera esencialmente en su estado gaseoso, debido a su alta presión de vapor y baja temperatura de condensación (inferior a 160 °C). El selenio que se usa para colorear o decolorar el vidrio, puede producir una elevada emisión de gases, debido a la formación de compuestos muy volátiles, con temperaturas de condensación tan bajas como 60 - 100 °C. En estos casos y para evitar la

evaluación de errores, debería equiparse el tren de muestreo con un sistema combinado de recogida simultánea de componentes gaseosos y partículas.

Tiempo de muestreo

Para los hornos regenerativos, además de los procedimientos estándar, que requieren un tiempo de muestreo adecuado para la recogida de una muestra representativa, una buena práctica debe tomar en cuenta el ciclo de inversión de los regeneradores. De hecho, las emisiones del proceso de fusión pueden variar considerablemente con el ciclo de temperatura de las cámaras, que aumenta durante el ciclo. A fin de llevar a cabo las mediciones con resultados comparables, el tiempo de muestreo debe abarcar un número par de ciclos de combustión. Esto también puede representar un problema con los ciclos de limpieza del equipo de eliminación.

Condiciones de referencia

En general, los valores límite de emisiones se indican en forma de concentración, con referencia a 0 °C, 101,3 kPa y otras condiciones específicas, como:

- ✓ Hornos de fusión continuos: 8 % oxígeno en volumen, seco
- ✓ Hornos discontinuos: 13 % oxígeno en volumen, seco
- ✓ Otras fuentes de emisiones: sin corrección de oxígeno o vapor de agua

En general, se usa la concentración de contaminantes para definir la conformidad con los valores límite de emisión. Esto es porque se mide directamente y no requiere la adquisición de información adicional referente al proceso de producción, que normalmente es necesaria para determinar los factores de emisión o las emisiones específicas (kg de emisión por tonelada de vidrio fundido). Sin embargo, se indican a veces los valores límite de emisiones en forma de concentración (mg/Nm^3) y factor de emisión ($\text{kg}/\text{tonelada de vidrio}$, kg/h , g/h). Esto ocurre especialmente en el caso de los gases residuales altamente diluidos (hornos eléctricos) y, generalmente, en presencia de altos porcentajes de oxígeno (oxicombustión). La corrección al 8 o al 13 % de oxígeno produciría resultados que no serían comparables con los de los hornos que usan combustibles fósiles y aire en vez de oxígeno para el proceso de fusión.

Medición continua

Se limita generalmente la aplicación de un control continuo a las emisiones generadas por el horno de fusión, siendo éste el flujo de masa más relevante y teniendo un nivel de emisiones relativamente constante. El control continuo de emisiones puede realizarse con equipos de medición in situ o de aspiración. Las mediciones in situ se realizan a lo largo de la chimenea, a la temperatura de los gases de combustión y la humedad del punto de muestreo. Las mediciones de aspiración están basadas en el acondicionamiento de la muestra de los gases de combustión y determinación subsiguiente de la concentración de contaminante en gas seco. Ambos sistemas requieren un cuidadoso mantenimiento y una calibración periódica mediante métodos de medición discontinuos. En particular, las mediciones realizadas por instrumentos in situ pueden verse afectadas por la distribución de color y tamaño de partículas, que cambian según el tipo de vidrio producido en el horno (verde, marrón, semiblanco) y el tipo de combustible usado.

La tabla siguiente indica los parámetros que pueden medirse continuamente y los métodos sugeridos:

Parámetro	Método
Oxígeno	Célula paramagnética de óxido de zirconio
Polvo	Opacidad lumínica, dispersión lumínica
Óxido de nitrógeno (NO)	Fotometría de infrarrojos o UV, quimiluminiscencia
Óxidos de nitrógeno (NO + NO ₂)	Fotometría de infrarrojos o UV, quimiluminiscencia equipada con convertidor (NO ₂ a NO)
Dióxido de azufre	Fotometría de infrarrojos o UV
Monóxido de carbono	Fotometría de infrarrojos
Hidrocarburos totales	Detector de Ionización de Llama (DIL)

Tabla 10.2: Técnicas de medición continua

Podrían medirse otros contaminantes continuamente, como HF y HCl, por potenciometría y fotometría de IR respectivamente, o por el método potenciométrico. Sin embargo, estas mediciones no son fáciles de realizar y requieren un recalibrado frecuente de los analizadores. Podría ser apropiado un control continuo de estos contaminantes para procesos de vidrio especiales que suponen el uso de compuestos de flúor y cloro en la composición de la mezcla, resultando en emisiones tras el sistema de eliminación.

En algunos Estados Miembros, la legislación nacional requiere la aplicación de una medición continua de emisiones para flujos de masa superiores a los valores siguientes:

Sustancia	Flujo de masa (kg/h)
Polvo	2 - 25
Dióxido de azufre	50 - 150
Óxidos de nitrógeno, como NO ₂	30 - 150
Monóxido de carbono, para evaluar la eficacia de la combustión	5
Monóxido de carbono, todos los demás casos	100
Compuestos fluorados, como HF	0,5
Compuestos clorados, como HCl	3 - 20

Nota: Los rangos indicados en la tabla son ejemplos de los requisitos legales alemanes y franceses, donde los valores más bajos son los requisitos alemanes.

Tabla 10.3: Flujo de masa para medición continua (Francia y Alemania)

Mediciones discontinuas

Pueden realizarse mediciones individuales mediante la separación de los distintos contaminantes (generalmente polvo, SO_x, HCl, HF, metales) en materiales de filtrado adecuados o soluciones de adsorción, o con instrumentos de medición extractivos continuos (fotometría de IR, UV para NO_x, SO₂, etc.). La cantidad de mediciones necesaria se establece generalmente en base a la variabilidad de las emisiones y el tiempo de la operación controlada. En algunos casos, la operación se realiza en un tiempo limitado que sólo permite una única medición (como en la manipulación de materias primas). Sin embargo, en la mayoría de los casos, para un proceso continuo caracterizado por emisiones estables, se requiere un mínimo de tres mediciones separadas, y para las emisiones variables, cinco mediciones separadas. En casos especiales, pueden ser necesarias hasta 8 ó 10 mediciones.

La tabla siguiente ofrece una indicación general de los métodos más corrientes que se usan.

Contaminante / Parámetro	Método
Polvo	Filtración y determinación gravimétrica
Óxidos de nitrógeno (NO + NO ₂)	Fotometría de IR o de UV, quimioluminiscencia. Absorción en una solución apropiada y determinación química (colorimetría, cromatografía iónica, etc.)
Dióxido de azufre (SO ₂)	Fotometría de IR o de UV
Óxidos de azufre (SO ₂ + SO ₃)	Absorción en una solución apropiada y determinación química (valoración, cromatografía iónica, CFI)
Óxido de azufre (SO ₃)	Absorción en una solución apropiada y determinación química (valoración, cromatografía iónica)
Metales (As, Pb, Cd, Se, Cr, Cu, V, Mn, Ni, Co, Sb, etc.)	Filtración y/o absorción en una solución apropiada. Determinación mediante AS, CFI.
Cloruros como HCl	Filtración y absorción en una solución apropiada. Determinación mediante cromatografía iónica, valoración
Fluoruros, como HF	Filtración y/o absorción en una solución apropiada. Determinación mediante electrodo específico, cromatografía iónica.
Sulfuro de hidrógeno	Filtración y/o absorción en una solución apropiada. Cromatografía iónica, determinación colorimétrica o revaloración
Formaldehído	Absorción en una solución apropiada. Determinación colorimétrica o mediante CLAP
Fenol	Absorción en una solución apropiada. Gas (líquido) Cromatografía o determinación colorimétrica
Amoníaco	Absorción en una solución apropiada. Cromatografía iónica, determinación colorimétrica o mediante electrodo específico
Aminas	Absorción en una solución apropiada o en gel de sílice. Determinación mediante CG, CLAP o CG-EM
Compuestos Orgánicos Volátiles	Detector de Ionización de Llama (DIL)
Oxígeno	Célula paramagnética de óxido de zirconio
Monóxido de Carbono	Fotometría de IR
Dióxido de Carbono	Fotometría de IR

Nota: Las técnicas relacionadas son ejemplos y no cubren todas las técnicas analíticas que pueden usarse para la determinación de los distintos contaminantes en la Industria del Vidrio.

Tabla 10.4: Técnicas de medición discontinuas

Por lo general, los métodos normativos nacionales e internacionales (ISO, CEN, VDI, EPA, etc.) están disponibles para medir la mayoría de parámetros de emisiones relevantes. Sin embargo, para una cantidad de sustancias, no existe ninguna metodología normativa. Este es el caso para la mayoría de sustancias orgánicas (fenol, formaldehído, aminas, etc.) así como para muchos compuestos inorgánicos que pueden liberarse en la atmósfera tanto en forma de partículas como gaseosa (Ej. compuestos de boro). Tal como se ha indicado, la buena práctica aconseja realizar un muestreo combinado (filtración y adsorción) para identificar y cuantificar las distintas fracciones.

Cálculo del balance de masa

En algunos casos, y para determinados contaminantes, un cálculo de balance de masa puede proporcionar una buena evaluación de las emisiones del proceso. Cuando se conocen con bastante exactitud la entrada y salida de una sustancia en un paso del proceso (como el de fusión), y cualquier cambio químico o físico, se puede usar el balance de masa como método cuantitativo para evaluar las emisiones. Por ejemplo, esto podría ser el caso para el SO₂ derivado de la fusión, el HF en la producción de vidrio opalino o el selenio en la producción del vidrio al bronce o vidrio al sílex. Generalmente, se calcula el balance de masa para comparar con el nivel de emisiones medido.

Interpretación y comunicación de los resultados de mediciones

A fin de ofrecer un nivel razonable de interpretación al informar sobre los resultados de las mediciones de emisiones, es importante detallar como mínimo la información siguiente:

- ✓ El método de medición aplicado;
- ✓ la precisión del método aplicado;
- ✓ las condiciones relevantes de funcionamiento (datos del proceso);
- ✓ las condiciones de referencia (humedad, temperatura en el punto de medición, etc.); y
- ✓ los resultados de cada medición separada o, en el caso de un control continuo, la distribución de frecuencia de todas las concentraciones medias semihorarias, horarias o diarias.

Conclusiones

Este anexo no intenta ofrecer ninguna metodología para la medición de las emisiones en la industria del vidrio. Cuando procede, normalmente existen métodos adecuados establecidos que deben evaluarse para cada aplicación. El objetivo de este anexo es dar información general, y señalar las posibles fuentes de evaluación errónea de los niveles de emisiones que pueden obtenerse mediante la aplicación de las distintas MTD.

CAPÍTULO 11. ANEXO IV: LEGISLACIÓN NACIONAL

A continuación de detalla la legislación tal como fue presentada por los Estados Miembros. No se ha realizado ninguna modificación de la información recibida.

11.1. Legislación de Luxemburgo

Valores límite de emisión para hornos de vidrio flotado, basados en permisos:

Contaminante	Planta 2	Unidad	Periodo medio
Polvo	50	mg/Nm ³	Media diaria
SO ₂	500	mg/Nm ³	Media horaria
NOx	500*	mg/Nm ³	Media diaria
HCl	30	mg/Nm ³	Media horaria
HF	5	mg/Nm ³	Media horaria

* valor objetivo a respetar después de la reconstrucción del horno y la optimización del proceso 3R.

Condiciones de referencia:

0 °C, 1.013 mbar, seco, 8 % O₂

Intervalo de medición:

Polvo y NOx: continuamente

Todas las demás sustancias: una vez al año

11.2. Legislación y reglamentos de Holanda

Legislación marco

Holanda tiene dos leyes marco principales referente al medio ambiente: la “Ley de Gestión Medioambiental” y la “Ley para la Contaminación de Aguas de Superficie”. Estas leyes juntas proporcionan el marco para la obtención de permisos medioambientales y permiten fijar las condiciones del permiso. Las leyes cumplen los requisitos de la Directiva IPPC y se garantiza la obtención de permisos integrales mediante un procedimiento concertado con las autoridades competentes.

Ambas leyes marco gobiernan varios Decretos y Reglamentos proporcionando requisitos acerca de las actividades potencialmente contaminantes.

Reglamentos

Reglamentos holandeses sobre emisiones (NeR)

Los Reglamentos de Emisiones de Holanda (NeR) se refieren a las emisiones de los procesos a la atmósfera y se definen como guías para la emisión de permisos o para la adaptación de las condiciones de concesión de licencias. Los NeR deben ser servir de guía para la concesión de permisos desde 1 de mayo 1992.

Los NeR siguen el mismo concepto básico que los reglamentos TA-Luft alemanes, excepto en lo referente a la clasificación de algunas sustancias, que ha sido adaptada en vista de los recientes avances toxicológicos. Además, los estándares de emisiones para algunas clases de sustancias han sido adaptados siguiendo los conocimientos actuales acerca de las mejores técnicas disponibles.

En los NeR, se indican los niveles de concentración para las distintas sustancias, que constituyen los límites máximos para emisiones de distintos puntos, según el flujo de masas. Los “reglamentos especiales” incluyen medidas para reducir las emisiones de evacuaciones puntuales o de fuentes difusas. Además,

en los “reglamentos especiales” se indican normas que se apartan de las “normas generales sobre emisiones” para determinadas industrias o instalaciones específicas.

Tanto la industria del vidrio como la industria de lana mineral están cubiertas por unas normas especiales. El reglamento especial para la industria de la lana mineral fue promulgado en mayo 1992. Incluye los siguientes requisitos:

Óxidos de azufre:

La emisión de dióxido de azufre procedente de los hornos de fusión debe ser reducida según la concentración de SO₂. Para concentraciones inferiores a 1.500 [mg/Nm³], existe la posibilidad de inyectar cal.

Para concentraciones superiores a 1.000 [mg/Nm³], debe considerarse como alternativa, la conversión a ácido sulfúrico. La concentración de SO₂ de los gases residuales emitidos no debe sobrepasar 400 [mg/Nm³] después del tratamiento.

Partículas:

La emisión de partículas debe controlarse mediante el uso de filtros de tejido u otra técnica que pueda lograr una concentración residual comparable.

Sustancias orgánicas:

Las normas generales de los reglamentos NeR, incluyendo la norma sobre acumulación, son aplicables a la emisión de sustancias orgánicas.

El reglamento especial para la industria del vidrio fue decretado en diciembre 1993. La traducción completa del “Reglamento Especial para la industria del vidrio” está incluida en las Notas Holandesas sobre MTD para la Industria del Vidrio y Lana Mineral. Este reglamento no es aplicable al vidrio plano, fibra de filamento continuo o lana de vidrio. Sin embargo, el reglamento menciona que “para controlar las emisiones procedentes de estos procesos, las tecnologías indicadas en este reglamento son básicamente aplicables, excepto el oxicombustión en la fabricación de vidrio laminado”.

La esencia del reglamento especial para la industria del vidrio reside en que hay dos vías posibles que puede seguir la industria del vidrio. Una vía implica la introducción de tecnología de oxicombustión antes del 2003 así como la introducción de eliminación de polvo e inyección de absorbente antes del 2010. La otra vía implica la introducción de eliminación de polvo e inyección de absorbente antes de 2003 y la eliminación de NOx antes de 2010. A continuación se indica una cita esencial del reglamento:

Paquete de medidas 1. Uso de un filtro electrostático/inyección de absorbente conjuntamente con modificaciones en los quemadores, conforme a la tecnología existente, seguido de medidas para el control de las emisiones de NOx

Lo antes posible, y en todo caso antes del año 2003 como máximo, se requiere el uso de un filtro electrostático con inyección de absorbente en conjunción con una mejor tecnología de los quemadores. Durante la subsiguiente revisión del horno, y en todo caso antes del año 2010, se requiere la puesta en práctica de medidas para reducir las emisiones de NOx. La elección de las medidas a implantar para la reducción de las emisiones de NOx dependerá de los avances tecnológicos.

Indicación no normativa de la tendencia en los factores de emisiones resultante del paquete de medidas 1:

componente	Nivel actual		hasta 2003	hasta 2010
NO _x (kg/tonelada vidrio fundido)	5,0	(- 20 %)	4,0	p.m.
SO ₂ (kg/tonelada vidrio fundido)	2,5	(- 60 %)	1,0	1,0

p.m.: La reducción de emisiones que se puede lograr usando medidas contra NOx en el periodo del 2003 al 2010, depende en gran medida de los desarrollos tecnológicos, y se especificará más adelante.

Paquete de medidas 2. Uso de tecnología de oxicombustión, seguido de medidas dirigidas a la reducción de SO₂, polvo, flúor y cloruros

Lo antes posible, y en todo caso antes del año 2003 como máximo, cambio al proceso de oxicombustión. Después del 2003, o lo antes posible, y en todo caso antes del año 2010, deberá ser puesta en práctica una tecnología de control más avanzada, tal como un filtro electrostático con inyección de absorbente, o una tecnología equivalente de reducción de emisiones.

Indicación no normativa de la tendencia en los factores de emisiones resultante del paquete de medidas 2:

componente	Nivel actual	hasta 2003		hasta 2010
NO _x (kg/tonelada vidrio fundido)	5	1		1
SO ₂ (kg/tonelada vidrio fundido)	2,5	2,5	(- 60 %)	1
polvo (kg/tonelada vidrio fundido)	0,4	0,3		0,1

La consecuencia de implantar primero un proceso de oxicombustión como medida para reducir las emisiones, es que la fecha límite en la que las demás emisiones (en particular plomo, HF y HCl) tienen que cumplir los requisitos y las condiciones generales de las Directrices Holandesas sobre Emisiones, debe estar en línea con el programa de puesta en práctica de las medidas que se serán introducidas en una segunda fase.

A la vista de los avances tecnológicos llevados a cabo, la puesta en práctica de dichas medidas tendrá que ser evaluada cada vez más en detalle por las autoridades competentes, a la hora de revisar los hornos o renovar los permisos. Además, pueden darse situaciones en hornos de vidrio individuales que permitan la implantación acelerada o combinada de medidas a corto plazo. Por lo general, si los resultados de la investigación práctica muestran, por ejemplo, que los factores esenciales de coste de las tecnologías estudiadas se desvían del conocimiento actual (en sentido positivo), esto dará lugar a una reevaluación de la aplicabilidad de las medidas combinadas antes del año 2003.

Los niveles de emisiones en el reglamento NeR no son legalmente vinculantes y el NeR no reemplaza a los acuerdos vinculantes existentes. Sin embargo, si las autoridades que conceden los permisos quieren apartarse del NeR, las razones para hacerlo deberán ser indicadas claramente en el preámbulo de la licencia.

Acuerdos voluntarios

Los acuerdos o convenios voluntarios (en Holandés: "Convenanten") son declaraciones de intenciones acerca de la implantación de pólizas medioambientales para determinados sectores industriales. Las declaraciones de intenciones son acuerdos entre las autoridades y la industria. La participación en un convenio ofrece la ventaja tanto a las autoridades competentes como a las compañías, de una vía más transparente, coherente y predecible para las mejoras e inversiones medioambientales. Los acuerdos se aplican actualmente a tres campos:

- Eficacia medioambiental general en contaminantes "tradicionales".
- Eficacia energética
- Reducción de CO₂

Eficacia medioambiental general en contaminantes "tradicionales"

En la declaración de intenciones del presente acuerdo voluntario, las autoridades han elaborado un Plan Integral de Objetivos Medioambientales (PIOM), basado en el Plan Nacional de Política Medioambiental (PNPM), la Memoria de Gestión del Agua, el Plan de Acción del Mar del Norte, el Programa de

Acción del Rin, la Memoria para la Conservación Energética y otros planes oficiales en el momento de la firma.

El Plan Integral de Objetivos Medioambientales se refiere a la contaminación medioambiental de los contaminantes “tradicionales” (SOx, NOx, COV, metales pesados, HAP, etc.) causada por el sector industrial correspondiente. El PIOM ha sido redactado para los años 1994/1995, 2000 y 2010.

Aparte de la reducción de las emisiones a la atmósfera, al agua y al suelo, el PIOM incorpora también una política para la conservación de la energía, del agua, la limpieza del suelo, riesgos de peligro, molestia por olores, ruido y sistemas de gestión internos. Sin embargo, se han acordado dos pactos más en lo que se refiere a conservación de energía y reducción de CO₂.

Para la "industria química", se suscribió una declaración de intenciones el 2 de abril de 1993. Un factor significante es el entendimiento de que visto el gran número de compañías distintas en la industria química, puede variar la contribución de cada una de ellas para la implantación del PIOM en la industria. La responsabilidad de las compañías individuales de contribuir a la implementación de la PIOM en la industria requiere que estas empresas adopten una posición activa. La contribución de una empresa se definirá en los Planes Medioambientales de la Empresa (PME), que son elaborados por cada empresa. Estos PME se renuevan cada cuatro años y deben ser aprobados por las autoridades que conceden los permisos.

Eficacia energética: Acuerdos a Largo Plazo sobre Eficacia energética

En Holanda, se han suscrito "Acuerdos a Largo Plazo sobre Eficacia Energética (en holandés, "MJA") entre el Ministerio de Economía y organizaciones representativas de muchos sectores industriales. El aspecto más importante de los MJA es el valor objetivo para la mejora de la eficacia energética en el sector industrial correspondiente en un determinado periodo de tiempo.

Para la elaboración de los MJA se han suscrito acuerdos bilaterales entre las distintas empresas y la agencia concesionaria, que es la Agencia Holandesa para la Energía y el Medio Ambiente (en holandés, NOVEM).

Para la industria del vidrio, se suscribió un MJA el 17 de julio de 1992, y la mejora acordada en la eficacia energética fue del 20% a lo largo del periodo 1989 - 2000 [78]. La mejora en la eficacia energética fue establecida por el plan tecnológico a largo plazo 1990 – 2010 de la industria holandesa de producción de vidrio [7]. En este plan se proponía la puesta en práctica de las siguientes medidas de ahorro energético en el periodo 1990 – 2000:

- ✓ Precalentamiento de la mezcla y del vidrio recuperado;
- ✓ Aumento del porcentaje de vidrio recuperado en las materias primas;
- ✓ Nuevos diseños de hornos con un bajo consumo de energía;
- ✓ Quemadores con un mejor intercambio de calor;
- ✓ Mejora de la calidad de los productos (menos pérdida de producción);
- ✓ Productos ligeros;
- ✓ Sistemas de oxícombustión.

Se espera que la mejora acordada del 20% en la eficacia energética producirá inversiones adicionales de unos 45 millones de EUR1998 en el periodo 1989 - 2000 [7]. Actualmente, se están manteniendo negociaciones para la segunda generación de acuerdos a largo plazo sobre eficacia energética. Los objetivos y el ámbito no han sido fijados todavía, y puede haber algunas empresas que se unan al “convenio sobre valores de referencia” (ver apartado siguiente) en lugar del acuerdo a largo plazo.

Reducción de CO₂: Convenio sobre Valores de Referencia

A la luz de los acuerdos de Kyoto, Holanda debe reducir las emisiones de CO₂. La mejora en la eficiencia energética es una de las medidas más importantes para reducir las emisiones de CO₂. El Convenio sobre Valores de Referencia es un acuerdo entre las autoridades holandesas y la industria holandesa con un consumo intensivo de energía. La industria acuerda situarse en la élite mundial en eficiencia energética, y las autoridades se abstendrán entonces de imponer medidas adicionales de reducción de CO₂. El convenio está abierto a todas las empresas con un consumo energético de 0,5 PJ anuales o más.

El acuerdo de principio se firmó el 6 de julio de 1999 entre las organizaciones industriales y las autoridades. Ahora que se ha firmado el acuerdo de principio, el convenio está abierto a las distintas empresas que quieran adherirse al mismo.

Para las empresas que no quieran adherirse o cuyo consumo energético sea < 0,5 PJ anuales, se seguirán los convenios “tradicionales” a largo plazo sobre eficiencia energética (ver arriba) [43,44]

11.3. Legislación vigente – Austria

Las emisiones a la atmósfera están reguladas por una orden (Boletín Oficial Federal N° 498/1994) que contiene los valores de los límites de emisiones para los distintos procesos, combustibles y materias primas. Además, se indica la frecuencia con que deben presentarse informes de control a las autoridades locales.

Polvo total: 50mg/Nm³

Elementos procedentes de sustancias sólidas y gaseosas:

Cd: 0,1 mg/Nm³

As: 0,1 mg/Nm³, excepto para vidrio empomado: As: 0,5 mg/Nm³

Co, Ni, Se c/u 1,0 mg/Nm³ pero total As, Cd, Co, Ni, Se: 1mg/Nm³

Sb, Pb, Cr, Cu, Mn c/u 5,0 mg/Nm³ , pero metales totales: 5mg/Nm³

SO₂ : 500 mg/Nm³

HCl: 30 mg/Nm³

HF: 5 mg/Nm³

NOx con una masa emitida de 2.5 kg/h o más:

1500mg/Nm³ para hornos de cuba de llama de bucle y llama transversal con precalentamiento regenerativo o precalentamiento cerámico de recuperación

900mg/Nm³ para hornos de cuba de llama transversal con otros precalentamientos de recuperación

800mg/Nm³ para hornos diarios, y

500mg/Nm³ para otras tecnologías de fusión.

- ✓ La medición de las emisiones debe cumplir con las Directrices VDI;
- ✓ El volumen de gas residual está restringido al mínimo inevitable;
- ✓ Control de Cumplimiento de las emisiones gaseosas: Media de tres valores medios de media hora – uno medido a las condiciones operativas relativas a un máximo de emisiones, todos medidos a las condiciones operativas normales;
- ✓ Las instalaciones ya autorizadas deben garantizar el cumplimiento cinco años tras el anuncio (entrada en vigor) de la orden.

Emisiones al agua: Los valores de límites de emisión, así como los métodos de control, están establecidos por una orden de carácter general (Boletín Oficial Federal N° 888/1995) que hace referencia a los distintos tipos de productos de vidrio y procesos relacionados.

Normalmente, el agua de refrigeración y el agua de proceso se mantienen en circuitos separados. Los sistemas de agua de refrigeración funcionan en circuitos cerrados, con una baja demanda de agua de aporte. El agua de proceso puede recircularse varias veces y se trata in situ (separador de aceite, sedimentación) antes de su evacuación al río (agua circulante) o a una planta municipal de tratamiento de aguas residuales. Los límites de emisión son distintos para ambos casos.

Vidrio de desecho (vidrio recuperado del consumo)

En Austria, el índice de reciclaje del vidrio de desecho es de alrededor del 77-79%. Esto significa que 200.000 t. de vidrio recuperado se reciclan en la producción de vidrio para envases.

- La clasificación del vidrio recuperado del consumo en Austria se realiza in situ.

Precalentamiento del vidrio recuperado

En las plantas austriacas, el vidrio recuperado no se precalienta.

Sin embargo, hay plantas en Alemania y Suiza en las que se precalienta el vidrio recuperado o el vidrio recuperado y la mezcla (materias primas mezcladas).

¿Hay problemas de residuos en el vidrio recuperado de consumo?

- Los residuos orgánicos en el vidrio recuperado producen una mayor demanda de oxígeno en el proceso de fusión, así como la emisión de sustancias orgánicas a la atmósfera.
- La separación de cerámicas y rocas en el vidrio recuperado se realiza automáticamente por métodos ópticos. La cantidad de cerámicas / rocas que se rompen con el vidrio recuperado y que pasan a la cuba de fusión depende de la eficacia de estos dispositivos de inspección óptica. Esto aumenta el número de artículos rechazados. La calidad se determina por el número de inclusiones por tonelada de vidrio.

¿Hay problemas de metales pesados en el vidrio recuperado?

Con unas pocas excepciones, el límite de 250 ppm de plomo en el vidrio para envases, fijado en la Directiva 94/62/CE (relativa a materiales de envase) puede cumplirse. El límite de 100 ppm de plomo en el vidrio, válido a partir del 30 de junio 2001, no puede garantizarse con índices de reciclaje de más del 50% como se están alcanzando actualmente en la producción de vidrio para envases en Austria.

Emisiones y Control

Las emisiones a la atmósfera están reguladas por una orden (Boletín Oficial Federal N° 498/1994) que contiene los valores de los límites de emisión para los distintos procesos, combustibles y materias primas. Además, establece la frecuencia con que deben presentarse informes de control a las autoridades locales.

La medición continua de las siguientes emisiones a la atmósfera se realiza en algunas de las plantas de producción de vidrio en Austria.: polvo, NOx, SO₂,

El oxígeno se mide asimismo de forma continua para la regulación del proceso.

Además, se realiza la medición continua de los siguientes parámetros:

HCl, HF, metales pesados

Emisiones al agua: Los valores de los límites de emisión, así como los métodos de medición se hallan establecidos en una orden general (Boletín Oficial Federal Nº 888/1995) que trata los distintos tipos de productos de vidrio y los procesos relacionados.

Residuos: Polvo de filtro, polvo de regenerador, residuo del separador de aceite, residuos de material refractario

Hornos eléctricos

En Austria existen actualmente tres cubas con un horno eléctrico.

Capacidad de las cubas: 2 cubas con aprox. 20 a 30 toneladas al día

1 cuba con aprox. 75 toneladas al día

Productos: Vidrio de plomo (vidrio doméstico, vajillas)

Fibra de vidrio

Vidrio especial para la industria automóvil

Proveedores de hornos eléctricos para cubas de fusión de vidrio (nombres de empresas):

Sorg, Grob, Horn

Motivos indicados por los operadores para el uso de los hornos eléctricos:

- ✓ geometría de la cuba,
- ✓ alimentación del vidrio-mezcla (parte superior fría / bóveda fría),
- ✓ relación consumo de electricidad / precio
- ✓ Consumo específico de energía,
- ✓ Emisiones a la atmósfera (Emisiones de NOx)

Valores de Emisión de NOx

Valor del Límite de Emisión para hornos de vidrio regenerativos o cerámicos de recuperación de llama de bucle o transversal en Austria: 1.500mg/Nm³, (8% O₂) según lo establecido en el Boletín Oficial Federal Nº 498/1994:

Valor de emisión para hornos regenerativos de llama de bucle aplicando sólo medidas de reducción primaria: 900 – 1.100 mg NOx / Nm³ (medición discontinua);

Valor de emisión para hornos regenerativos de llama de bucle aplicando sólo medidas de reducción primaria: 1.100 – 1.300 mg NOx / Nm³ (medición continua);

Está previsto un ensayo piloto para una mayor reducción de las emisiones de NOx aplicando “combustión por etapas”.

Emisiones de NOx de hornos eléctricos: 15 mg/Nm³ #)

Emisiones de NOx de hornos eléctricos con nitrato sódico como agente de afino:

(vidrio emplomado): 240 mg/Nm³ #)

media de varios (mínimo 3) valores medios de media hora, medición discontinua.

11.4. Legislación y Reglamentación en Finlandia

No hay una reglamentación específica en relación con la fabricación de vidrio en Finlandia.

Los permisos medioambientales se basan en un estudio caso por caso. Un punto inicial para determinar las condiciones de concesión de permisos son las circunstancias locales, como la situación geográfica y las condiciones medioambientales locales.

La legislación medioambiental se compone de una serie de leyes individuales. Actualmente está en preparación una nueva Ley de Protección Medioambiental que combinará las leyes medioambientales según los requisitos de la Directiva del Consejo 96/61/CE de septiembre de 1996 relativa a la prevención y control integrado de la contaminación. La nueva ley tendrá validez a partir del 1.3.2000.

Actualmente, el enfoque integrado se incluye en dos procedimientos separados de obtención de permiso: el procedimiento de permiso medioambiental según la Ley (735/1991) y el Decreto (772/1992) de Procedimiento de Permiso Medioambiental y el procedimiento de permiso de evacuación de aguas según la Ley (264/1961) y el Decreto del Agua (282/1962).

Ya en la actualidad, la Ley de Procedimientos de Permisos Medioambientales combina los procedimientos de permiso de la Ley y el Decreto de Control de la Polución Atmosférica, la Ley y el Decreto de Residuos, la Ley y Decreto de Protección de la Salud. Las solicitudes de permiso, incluidos los documentos y emisiones, son públicas, y las personas y organizaciones afectadas por el proyecto tienen derecho a presentar alegaciones.

En la redacción de los permisos medioambientales se utiliza la Recomendación HELCOM 14/3 de 1993 (Comisión de la Región del Mar Báltico, Convención de Helsinki). Algunos permisos medioambientales a fabricantes de vidrio se redactaron antes de la entrada en vigor de la Recomendación HELCOM. La mayoría de permisos de la industria del vidrio son bastante antiguos y se reconsiderarán de acuerdo con la nueva Ley de Protección Medioambiental. Los límites de emisión utilizados en los permisos son:

Hornos para vidrio

Polvo 50 mg/Nm³

NOx 2,5-4 kg/tonelada

Procesos de Acabado en Lana Mineral

Fenol 0,7 kg/ tonelada

Formaldehído 0,15 kg/ tonelada

Amoníaco 1,5 kg/ tonelada

En todos los permisos medioambientales se incluye la medición obligatoria. Normalmente es obligatorio realizar la medición regular de todas las emisiones con una frecuencia de uno a tres años. Además, las instalaciones están obligadas a:

- ✓ Minimizar los riesgos para la salud humana y el medio ambiente de sustancias tóxicas, persistentes y bioacumulativas.

- ✓ Sustituir las sustancias peligrosas en la medida de lo posible.
- ✓ Minimizar la cantidad e residuos y reciclar los residuos en la medida de lo posible.
- ✓ Recircular las aguas de proceso si es posible.
- ✓ Mantener un registro de las emisiones y residuos.
- ✓ Informar sobre las emisiones y residuos a la autoridad competente cada año.

11.5. Marco legislativo y reglamentario en Francia

El marco legislativo francés se basa en la ley de 9 de julio de 1976, denominada ley sobre instalaciones registradas para protección medioambiental, y sus dos decretos de aplicación.

El decreto de 21 de septiembre de 1977 especifica el procedimiento que debe seguirse para obtener un permiso de explotación.

El segundo decreto indica el tipo de instalaciones o plantas que precisan un permiso.

Depende del sector y del nivel de actividad.

Este texto define asimismo si se requiere un permiso específico para el centro (procedimiento de autorización) o un procedimiento general (procedimiento de declaración).

Algunas actividades no precisan autorización debido a su escaso impacto medioambiental.

El permiso específico para el centro es concedido por las autoridades locales (la prefectura del departamento en el que está situada la planta) tras una investigación pública.

El permiso que define las condiciones de explotación, los valores de los límites de emisión y los requisitos de medición tiene en cuenta lo siguiente:

- ✓ Los reglamentos nacionales existentes para una actividad específica o grupo de sectores,
- ✓ El impacto medioambiental local de la planta.

El permiso específico para la planta, elaborado mediante un enfoque integral, sólo puede ser más restrictivo que los reglamentos nacionales.

Para la industria del vidrio existe un reglamento nacional publicado en 1993. La orden de 14 de mayo de 1993 es aplicable a las plantas con una capacidad de producción de más de 5 t./día para vidrio sodocálcico, y de 0,5 t./día para vidrios especiales. Estas plantas requieren asimismo un permiso específico.

La orden de 14 de mayo de 1993 se adjunta en el Anexo 1, y a continuación se facilitan los principales requisitos para el control de la polución atmosférica.

Debe respetarse uno de los dos valores de límites de emisión, expresados en concentración (mg/Nm^3) de gases secos con un contenido de oxígeno del 8 %) o en peso emitido por tonelada de vidrio producido (kg/tv).

Polvo (para una capacidad de producción de vidrio superior a 50 toneladas/día)

- 0,2 kg/tv o 50 mg/Nm^3
- 0,35 kg/tv o 50 mg/Nm^3 para vidrios especiales

SOx (en SO₂)

Vidrios no oxidados:

- 1 kg/tv o 500 mg/ Nm³ para combustión a gas
- 3 kg/tv o 1500 mg/ Nm³ para combustión con combustible líquido

Vidrio oxidado

- 1,5 kg/tv o 750 mg/ Nm³ para combustión a gas
- 3,6 kg/tv o 1.800 mg/ Nm³ para combustión con combustible líquido
- 0,5 kg/tv o 250 mg/ Nm³ para hornos eléctricos

NOx (en NO₂):

- Hornos regenerativos:

Hornos de llama de bucle

- 3 kg/tv o 1.500 mg/ Nm³ para combustión a gas
- 2,6 kg/tv o 1.300 mg/ Nm³ para combustión con combustible líquido

Hornos de llama transversal

- 4 kg/tv o 2.000 mg/ Nm³ para combustión a gas
- 3 kg/tv o 1.500 mg/ Nm³ para combustión con combustible líquido

- Hornos recuperativos:

- 2,7 kg/tv o 900 mg/ Nm³ para combustión a gas
- 2,1 kg/tv o 700 mg/ Nm³ para combustión con combustible líquido

- Hornos eléctricos:

- 1 kg/tv o 500 mg/ Nm³

Para los vidrios especiales y vidrios oxidados por compuestos de nitrato, se doblan los valores límite de emisión de NOx.

La aplicación de estos valores límite de emisión se programan como indica la tabla siguiente:

Instalaciones nuevas		Fecha de la instalación
Ampliación de capacidad superior al 25%		Fecha de extensión
Aumento de emisiones superior al 10%		Fecha de aumento de emisión
Instalaciones antiguas	SOx	9 julio 1998
	NOx	9 julio 2001
	Polvo	9 julio 2003

El Decreto del 14 de mayo de 1993 también establece unos requisitos relativos a los metales pesados, HCl HF ... y a la contaminación del agua, ruido...

Este texto tiene un enfoque integrado para la prevención y control de la contaminación en la industria del vidrio. Este Decreto fue modificado en 1996.

Si un horno puede respetar los siguientes límites de emisión:

- Hornos recuperativos: 1 kg/tv o 500 mg/Nm³,

- Hornos regenerativos:

- Hornos de llama de bucle: 1,5 kg/tv o 700 mg/ Nm³

- Hornos de llama transversal: 2 kg/tv o 1.100 mg/ Nm³

los valores límite permitidos de emisión de polvo son de 0,35 kg/tv o 150 mg/ Nm³ hasta 2004.

Un impuesto sobre contaminación atmosférica completa este marco legislativo y reglamentario.

El primer impuesto sobre contaminación atmosférica fue creado en 1985, por un plazo de 5 años. Inicialmente, sólo afectaba a los óxidos de azufre. Posteriormente, fue renovado dos veces, una en 1990 y luego de nuevo en 1995.

Únicamente las instalaciones sometidas a un procedimiento de autorización están afectadas por el impuesto.

Las fuentes imponibles actualmente son:

- las instalaciones de combustión superiores a 20 MW,

- las incineradoras municipales de residuos sólidos superiores a 3 t/h,

- otros tipos de instalaciones registradas con emisiones superiores a 150 t/año de SO₂ (o H₂S expresado como SO₂), NOx, expresado como NO₂ equivalente, HCl o COVs no metánicos.

El tipo impositivo actual es de 180 FF / tonelada de SO₂, H₂S (expresado como SO₂), HCl, NOx (como NO₂), N₂O y COVs. Desde el 1º enero 1998, los tipos para NOx y COVs han aumentado a 250 FF/tonelada.

La recaudación tributaria es de unos 250 MFF/año.

El impuesto sobre contaminación atmosférica es un impuesto redistributivo.

- Se usan al menos 60% de los fondos acumulados para subvencionar la instalación de prevención o el equipo de tratamiento.

Únicamente las industrias que tienen en cuenta estos criterios son aptas para estas subvenciones. Se les exige llegar a emisiones muy por debajo de las prescritas a nivel nacional o de la UE, o realizar modificaciones considerablemente antes de la fecha de entrada en vigor de las normativas nacionales o de la UE sobre niveles de emisiones. El tipo de subvención dependerá de la eficacia e innovación de las técnicas.

La cantidad de fondos acumulados, que no son redistribuidos para la prevención de la contaminación atmosférica (40 % de los fondos acumulados como máximo) puede ser utilizada para:

- Investigación aplicada a soportes e iniciativas de desarrollo en el campo de las técnicas de medición o eliminación (prevención o tratamiento).

- Financiar las redes de control de calidad del aire (equipo y costes operacionales).

- Realizar estudios técnicos o económicos relacionados con emisiones, inventarios, estrategias de desarrollo,...

El tipo impositivo no es lo bastante elevado para ser incitativo (generalmente es menos costoso pagar el impuesto que instalar un sistema de eliminación eficiente). Sin embargo, debido a la relativamente alta cantidad de subvenciones concedidas (especialmente en el pasado), este sistema de redistribución de impuestos ha resultado ser una herramienta eficiente y flexible, como complemento de las normas para apoyar la instalación de las mejores tecnologías disponibles.

11.6. Legislación italiana

La legislación vigente está basada en el Decreto del Ministerio de Medio Ambiente de 12 Julio 1990, referente a plantas ya existentes.

Valores límite generales de emisión, aplicados a la mayoría de sectores industriales:

Para sustancias carcinógenas:

Sustancias de la Clase 1: normalmente no están presentes en la industria del vidrio

Si el flujo de masa B 0,5 g/h, el límite de emisión es 0,1 mg/Nm³.

Sustancias de la Clase 2: Arsénico, Cromo (VI), Cobalto, Níquel, etc.

Si el flujo de masa B 5 g/h, el límite de emisión es 1 mg/Nm³.

Sustancias de la Clase 3: normalmente no presentes en la industria del vidrio.

Si el flujo de masa > 25 g/h, el límite de emisión es 5 mg/Nm³.

Para sustancias inorgánicas en forma de partículas:

Sustancias de la Clase 1: Cadmio, mercurio, etc.

Si el flujo de masa > 1 g/h, el límite de emisión es 0.2 mg/Nm³.

Sustancias de la Clase 2: Selenio, etc.

Si el flujo de masa B 5 g/h, el límite de emisión es 1 mg/Nm³.

Sustancias de la Clase 3: Antimonio, Cromo (III), Cuarzo con Plomo, Cobre, Estaño, Vanadio.

Si el flujo de masa B 25 g/h, el límite de emisión es 5 mg/Nm³.

Para sustancias inorgánicas en forma de gas

Sustancias de la Clase 1: normalmente no presentes en la industria del vidrio.

Si el flujo de masa > 10 g/h, el límite de emisión es 1 mg/Nm³.

Sustancias de la Clase 2: Fluoruros como HF, etc.

Si el flujo de masa > 50 g/h, el límite de emisión es 5 mg/Nm³.

Sustancias de la Clase 3: Cloruros como HCl, etc.

Si el flujo de masa > 0,3 Kg/h, el límite de emisión es 30 mg/Nm³.

Sustancias de la Clase 4: Amoniaco.

Si el flujo de masa > 2 Kg/h, el límite de emisión es 250 mg/Nm³.

Sustancias de la Clase 5: Óxidos de Nitrógeno como NO₂; Óxidos de azufre como SO₂

Si el flujo de masa > 5 Kg/h, el límite de emisión es 500 mg/Nm³.

Para sustancias orgánicas en forma de gas y de partícula

Sustancias de Clase 1: Metilacrilato, Isocianato, etc.

Si el flujo de masa > 25 g/h, el límite de emisión es 5 mg/Nm³.

Sustancias de Clase 2: Fenoles, Formaldehído, etc.

Si el flujo de masa > 0,1 Kg/h, el límite de emisión es 20 mg/Nm³.

Sustancias de Clase 3: Alcohol isobutílico, etc.

Si el flujo de masa > 2 Kg/h, el límite de emisión es 150 mg/Nm³.

Sustancias de Clase 4:

Si el flujo de masa > 3 Kg/h, el límite de emisión es 300 mg/Nm³.

Sustancias de Clase 5: Acetona, etc.

Si el flujo de masa > 4 Kg/h, el límite de emisión es 600 mg/Nm³.

Polvo

Si el flujo de masa > 0,5 Kg/h, el límite de emisión es 50 mg/Nm³.

Si el flujo de masa > 0,1 Kg/h y < 0,5 Kg/h, el límite de emisión es 150 mg/Nm³.

Valores límite específicos de emisión, aplicados a hornos para producción de vidrio

Óxidos de Nitrógeno como NO₂

	Fuel-oil mg/Nm ³	Gas natural mg/Nm ³
Hornos de crisoles	1.200	1.200
Cubas continuas con recuperación de calor	1.200	1.400
Hornos diarios	1.600	1.600
Hornos regenerativos de llama de bucle (llama en U)	1.800	2.200
Hornos regenerativos de llama transversal	3.000	3.500

Por razones de calidad, el uso de nitratos en la mezcla permite doblar el valor límite.

Óxidos de azufre como SO₂

Hornos diarios y hornos de crisoles 1.100 mg/Nm³

Cubas continuas de vidrio 1.800 mg/Nm³

Polvo total

Si la producción es > 250 t./día, el límite de emisión es 80 - 100 mg/Nm³

Si la producción es < 250 t./día y el flujo de masa es > 0,1 kg/h, el límite de emisión es 150 mg/Nm³

Para tubos de fibra de vidrio de borosilicato, de filamentos continuos, el límite de emisión es 350 mg/Nm³.

Los valores se refieren a volúmenes para gas seco, al 8 % de oxígeno para cubas de vidrio continuas, al 13 % de oxígeno para hornos discontinuos

Nota: Los valores límite de emisión se aplican para las plantas ya existentes. Generalmente, para un horno que trabaja a niveles de emisión inferiores a los límites oficiales, se necesita mantener dichos valores. Para determinadas zonas o por motivos específicos, pueden aplicarse valores inferiores.

Para plantas nuevas, las autoridades regionales pueden decidir usar los mismos límites (raramente) o, normalmente se aplican límites más estrictos, basados en las “mejores tecnologías disponibles”.

11.7. Límites de emisión estándar para la industria del vidrio en la región de Valonia en Bélgica (acuerdo voluntario)

		Vidrio para Envases y Vidrio Plano			Fibra de Vidrio y Vidrio Especial		
		Capacidad ≥ 5 t/día		Capacidad ≥ 50 t/día			0,5 t/día < Capacidad < 50 t/día
		5 ≤ --- ≤ 50 t/día		> 50 t/ día			5 < --- > 10 t/día
POLVO	mg/Nm ³	5	50	50	0,2	0,35	14 < --- > 1,1 < --- > 0,35
SOx	kg/t. mat fusión	1,2 < --- < 0,2					
Sulfatos = 0	g/Nm ³	Fuel-oil	Gas	Fuel-oil	Gas	Fuel-oil	Gas
	kg/t. mat. fusión	1,5 3	0,5 1	1,5 3	0,5 1	1,5 3	0,5 1
Sulfatos > 0	g/Nm ³	Fuel	Gas	Electr.	Fuel-oil	Fuel-oil	Gas
	kg/t. mat. fusión	1,8 3,6	0,75 1,5	0,25 0,5	1,8 3,6	0,75 1,5	0,75 1,5
NOx	CF	EF	R	E			
(*)	Fuel-oil/ Gas	Fuel-oil/ Gas	Fuel-oil/ Gas	Fuel-oil/Gas	R		R
(*)	g/Nm ³	1,5/2,0	1,3/1,5	0,7/0,9	0,5	0,7/0,9	0,7/0,9
(*)	kg/t. mat. fusión	3,0/4,0	2,6/3,0	2,1/2,7	1	2,1/2,7	2,1/2,7
Nitratos = 0	CF	EF	R	E			
(**)	Fuel-oil/ Gas	Fuel-oil/ Gas	Fuel-oil/ Gas	Fuel-oil/Gas	R		R
(**)	g/Nm ³	3,0/2,0	1,3/1,5	0,7/0,9	0,5	0,7/0,9	0,7/0,9
(**)	kg/t. mat. fusión	3,0/4,0	2,6/3,0	2,1/2,7	1	2,1/2,7	2,1/2,7
Nitratos > 0	CF	EF	R	E			
(**)	Fuel-oil/ Gas	Fuel-oil/ Gas	Fuel-oil/ Gas	Fuel-oil/Gas	R		R
(**)	g/Nm ³	3,0/4,0	2,6/3,0	1,4/1,8	1,0	1,4/1,8	1,4/1,8
(**)	kg/t. mat. fusión	6,0/8,0	5,2/6,0	4,2/5,4	2	4,2/5,4	4,2/5,4
HCl(***)	mg/Nm ³		50/100		50/100		50/100
	kg/t. mat. fusión		0,175/0,350		0,175/0,350		0,175/0,350
HF(***)	mg/Nm ³		5,0/2,0		5,0/2,0		5,0/2,0
	kg/t. mat. fusión		0,035/0,14		0,035/0,14		0,035/0,14
NH ₃ (****)	mg/Nm ³		50		50		50
METALES PESADOS (*****)	mg/Nm ³		kg/t. mat. fusión	mg/Nm ³	kg/t. fusión	mg/Nm ³	kg/t. fus.
Cd				0,2	0,0014	0,2	0,0014
As,Se,Co,Ni,Cr ⁶⁺				1	0,007	1	0,007
Sb				3	0,021	3	0,021
As _{gas} ,Cr _{tot} ,Pb,V				5	0,035	5	0,035
(Cr ⁶⁺ +Pb+Cd+Sb+Ni+Co+Se+V) (Cr _{tot} +Pb+Cd+Sb+Ni+Co+Se+V)		≤ 5	≤ 0,035	≤ 5	≤ 0,035	≤ 5	≤ 0,035

< --->: Interpolación Lineal; CC= Hornos de llama transversal; CF= Hornos de llama de bucle (Regenerativos); R= Unidad fundidora, hornos de crisoles (Recuperativos); E= Hornos de fusión eléctricos.

Valores límite de emisiones: a 20,8 % O₂ (hornos de fusión eléctricos), 13 % O₂ (hornos de crisoles) o 8 % O₂ (otros), que deben cumplirse, en (mg o g)/Nm³ o kg/t de material fundido.

(*) No para Fibra de Vidrio.

(**) Para Fibra de Vidrio solamente, usar yy en xxx/yy

(***) Materias primas sin Cl o F / con Cl o F.

(****) Para desnitrificación.

GLOSARIO

Abreviaturas			
Pul.á.c.	Pulido con ácido	IPPC	Prevención y Control Integrado de la Contaminación
MTD	Mejores Técnicas Disponibles	IS	Sección Individual
DBO	Demanda Biológica de Oxígeno	NL	Holanda
DQO	Demanda Química de Oxígeno	FCR	Fibra Cerámica Refractaria
CPIV	Comité Permanente de Industrias del Vidrio	SCR	Reducción Catalítica Selectiva
RQC	Reducción Química con Combustible	SNCR	Reducción Catalítica No Selectiva
CRT	Tubo de Rayos Catódicos	tpd	toneladas por día
DQV	Deposición Química de Vapor	TV	Televisión
CE	Comisión Europea	GB	Gran Bretaña
PE	Precipitador Electrostático	USA	Estados Unidos de América
UE	Unión Europea	COV	Compuestos Orgánicos Volátiles
EURIMA	Asociación Europea de Fabricantes de Aislantes	PEH	Precipitador Electrostático Húmedo

Elementos			
Ag	Plata	Li	Litio
Al	Aluminio	Mg	Magnesio
Ar	Argón	Mn	Manganeso
As	Arsénico	Mo	Molibdeno
B	Boro	N	Nitrógeno
Ba	Bario	Na	Sodio
Be	Berilio	Ni	Níquel
Bi	Bismuto	O	Oxígeno
C	Carbono	P	Fósforo
Ca	Calcio	Pb	Plomo
Cd	Cadmio	Pd	Paladio
Ce	Cerio	Pt	Platino
Cl	Cloro	S	Sulfuro
Co	Cobalto	Sb	Antimonio
Cr	Cromo	Se	Selenio
Cs	Cesio	Si	Silicio
Cu	Cobre	Sn	Estaño
F	Flúor	Sr	Estroncio
Fe	Hierro	Ti	Titanio
H	Hidrógeno	V	Vanadio
Hg	Mercurio	W	Tungsteno (Wolframio)
K	Potasio	Zn	Zinc
		Zr	Zirconio

Fórmula química utilizada normalmente en el documento			
<chem>Al2O3</chem>	Oxido de Aluminio, alúmina	<chem>MgCO3</chem>	Carbonato de magnesio
<chem>B2O3</chem>	Trióxido de boro,	<chem>MgO</chem>	Oxido magnésico, magnesia
<chem>CaCO3</chem>	Carbonato cálcico, piedra caliza	<chem>N2</chem>	Nitrógeno molecular
<chem>CaF2</chem>	Fluoruro cálcico, espato flúor	<chem>Na2CO3</chem>	Carbonato sódico
<chem>CaO</chem>	Oxido cálcico, cal	<chem>Na2O</chem>	Oxido de sodio
<chem>Ca(OH)2</chem>	Hidróxido cálcico, cal apagada	<chem>Na2SO4</chem>	Sulfato sódico
<chem>CaSO4</chem>	Sulfato cálcico	<chem>N2O</chem>	Oxido nitroso
<chem>CO</chem>	Monóxido de carbono	<chem>NO</chem>	Oxido nítrico
<chem>CO2</chem>	Dióxido de carbono	<chem>NO2</chem>	Dióxido de nitrógeno
<chem>Fe2O3</chem>	Oxido de hierro, óxido férrico	<chem>NOx</chem>	Óxidos de nitrógeno (NO y NO ₂ sólo)
<chem>HCl</chem>	Cloruro de hidrógeno	<chem>PbO</chem>	Oxido plomo, plomo amarillo, litarge
<chem>HF</chem>	Fluoruro de hidrógeno	<chem>Pb3O4</chem>	Oxido plomo, plomo rojo, minio, tetraóxido de plomo
<chem>H2S</chem>	Sulfuro de hidrógeno	<chem>SiO2</chem>	Dióxido de silicio
<chem>H2SiF6</chem>	Ácido Hexafluorosilícico	<chem>SO2</chem>	Dióxido de azufre
<chem>H2SO4</chem>	Ácido sulfúrico	<chem>SO3</chem>	Trióxido de azufre
<chem>K2CO3</chem>	Carbonato potásico, potasa	<chem>SOx</chem>	Oxido de azufre (SO ₂ y SO ₃)
<chem>K2O</chem>	Oxido potásico		

Unidades			
euro	Moneda de la UE (Estados miembros)	kWh	Kilowatio por hora
kPa	KiloPascal	J	Julio
°C	Grado centígrado / Celsius	GJ	Gigajulio
g	gramo	s	segundo
kg	kilogramo	h	hora
t.	tonelada métrica (1.000kg)	d	día
mm	milímetro	y	año
cm	centímetro	t./d	toneladas por día
m	metro	t./y	toneladas por año
m ²	metro cuadrado		
m ³	metro cúbico		
Nm ³	m ³ a 273K, 101,3 kPa, seco		

Prefijos			
η	nano 10^{-9}	M	mega 10^6
μ	micro 10^{-6}	G	giga 10^9
m	mini 10^{-3}	T	tera 10^{12}
c	centi 10^{-2}	P	peta 10^{15}
k	kilo 10^3		

REFERENCIAS

[96/61/CE]

Directiva 96/61/CE relativa a la prevención y control integrado de la contaminación (10/10/96)

[tm1, UKDoE]

Pollution Control at Large Glass Works, UK Department of the Environment, Environmental Resources Limited, March 1991, gls/tm/1.

[tm2 3R]

3R Process, NOx Control Technology from Pilkington, Pilkington company publication, September 1994, gls/tm/2.

[tm3 NOxEPA]

Alternative Control Techniques Document – NOx Emissions from Glass Manufacturing, United States Environmental Protection Agency, June 1994, gls/tm/3.

[tm4 VDI88]

Verein Deutscher Ingenieure Guidelines (VDI 2578) Emission Control Glassworks, 1988.

[tm5 EEO]

Energy Efficient Environmental Control in the Glass Industry, Good Practice Guide 127, UK Energy Efficiency Office, 1995, gls/tm/5.

[tm6 NOx Ind.duVerre]

Reduction des Emissions d'Oxydes d'Azote dans L'Industrie du Verre, Comité de Suivi du Verre, Arrêté du 14 mai 1993, July 1996, gls/tm/6.

[tm7 HMIP]

Technical and Economic Review of Technique to Control Emissions from Non-asbestos mineral fibres and Frit Manufacturing Processes, Environment Agency (England and Wales), August 1996, gls/tm/7.

[tm8, S2 3.03]

IPC Guidance Note S2 3.03, Manufacture of glass fibres, other non-asbestos mineral fibres, glass frit, enamel frit and associated processes, Environment Agency, HMSO, September 1996, ISBN 0-11-310121-X, gls/tm/8.

[tm9 BATNEEC4.3]

BATNEEC Guidance Note – Glass Production (Draft), Irish Environmental Protection Agency, 1996, gls/tm/9.

[tm10 BATNEEC4.2]

BATNEEC Guidance Note – Manufacture of Glass Fibre or Mineral Fibre (Draft), Irish Environmental Protection Agency, 1996, gls/tm/10.

[tm11 SOx]

Prévention et traitement des émissions d'oxydes de soufre, Actes du Colloque, Colloque National, 4 et 5 Dé1997, Le Havre, gls/tm/11.

[tm12 desulf]

Les techniques de desulfuration des procedes industriels (Draft Version) 1998, gls/tm/12.

[tm13 Ademe NOx]

Comment réduire les émissions d'oxydes d'azote d'origine industrielle?, Recueil des conférences des journées techniques organisées à Angers les 25 et 26 septembre 1996, Ademe, gls/tm/13.

[tm14 ETSU]

Energy Technology in the Glass Industry Sector (Thermie), ETSU, AEA Environment and Energy, March 1992.

[tm15 Italy]

Documento de Referencia para la Aplicación de la Directiva IPPC 96/61/CE a la Industria Italiana del Vidrio, Edited B Scalet, Stazione Sperimentale del Vetro, January 1998.

[tm16 USEPA]

EPA Office of Compliance Sector Notebook Project, Profile of the Stone, Clay, Glass, and Concrete Products Industry, US Environmental Protection Agency, September 1995, gls/tm/16.

[tm17 Ercole]

Oxycombustion: The Problems and Perspectives for Development of its Use in Glass Containers Production, P Ercole, Paper presented at US Ceramic Society congress on glass, San Francisco, July 1998, gls/tm17.

[tm18 CPIV]

Documento de Referencia CPIV sobre MTD para la Industria del Vidrio Europea, Enero 1998
Comité Permanent des Industries du Verre, gls/tm/18. Incluye suplementos.

[tm19 5yrsLoNOx]

Five years of operational experience with the SORG LoNOx Melter, Ehrig, Wiegand and Neubauer, Glastech. Ber. Glass Sci. Technol. 68 (1995) No2, gls/tm/19.

[tm20 SORG]

Optimierung einer großen Glasschmelzwanne durch Primärmaßnahmen, um eine emissionsarme und energiesparende Betriebsweise zu ermöglichen, Niklaus Sorg GmbH & Co, 1997, gls/tm/20.

[tm21, Schott]

Schott Guide to Glass second Edition, Ed HG Pfaender, Chapman & Hall, 1996

ISBN 0-412-71960-6. gls/tm21.

[tm22 BOC]

Environmental Technologies for Glass, A Guide to Green Glass Manufacturing, Lehman and Umeza, BOC Gases, 1996, gls/tm/22.

[tm23 SCRPLM]

First practical experiences with an SCR deNOx facility in a container glassworks, Schmalhorst and Ernas, Glastech. Ber. Glass Sci. Technol. 68 (1995) No5, gls/tm/23.

[tm24 FENIX]

Saint-Gobain Vitrage Réduit les Rejets de NOx du Float D'Aniche à près de 500 mg/Nm³ par des Mesures Primaires, Brulin, Delacroix, Laffont and Tackels, L'Industrie Céramic & Verrière-No938-6-7/98, 1998, gls/tm/24.

[tm25 Special]

Documento de Referencia de la Industria Europea del Vidrio Especial para la Implementación de la Directiva 96/61/EC, Comité Permanent des Industries du Verre, May 98, gls/tm/25. Incluye suplementos.

[tm26, EURIMA]

Nota de referencia EURIMA sobre MTD en la producción de lanas aislantes, Octubre 1998.

Asociación Europea de Fabricantes de Aislantes, gls/tm/26. Incluye suplementos.

[tm27, Domestic]

Documento de Referencia de la Industria Europea de Vidrio para Vajillas y Vidrio Doméstico para la implementación de la Directiva 96/61/CE, Comité Permanent des Industries du Verre (European Domestic Glass Sector), April 98, gls/tm/27. Incluye suplementos.

[tm28, EMPA]

Life Cycle Inventories for the Production of Sodium Silicates, EMPA, Bericht Nr. 241, M Fowler, 1997.

[tm29, Infomil]

Dutch Notes on BAT for the Glass and Mineral Wool Industry, Infomil for Dutch Ministry of Environment (Directorate for Air and Energy), December 1998.

[tm30 Dust]

An examination of the low environmental impact of dust emitted by soda-lime glass furnaces, CPIV, 1998, gls/tm/30.

[tm31 69/493/CEE]

Directiva del Consejo 69/493/CEE sobre la aproximación de las leyes de los Estados Miembros en relación con el vidrio de cristal, 1969, Boletín Oficial de la Comunidad Europea, gls/tm/31.

[tm32 Beerkens]

Abatement of glass furnace emissions techniques, performance, costs and possible combinations of abatement techniques, RGC Beerkens, February 1999, gls/tm/32.

[tm33 10NOx]

Primary measures for the NOx reduction on glass melting furnaces, Sieger, Glastech. Ber. 62 (1989) Nr.5, gls/tm/33.

[tm34 SCRCG]

Experience with an SCR DeNOx plant for container glass furnaces, Schmalhorst, Ernas and Jeschke, Glastech. Ber. Glass Sci. Technol. 70 (1997) No11, gls/tm/34.

[tm35 SNCR]

Noncatalytic removal of nitrogen in a recuperative container glass furnace, Pabst, Glastech. Ber. Glass Sci. Technol. 67 (1994) No.3, gls/tm/35.

[tm36 FENIXpat.]

Patente número WO 98/02386, Método y Dispositivo para la Reducción de las Emisiones de NOx en un Horno de Vidrio, Saint-Gobain Vitrage, 1998, gls/tm/36.

[tm37 3Rpat.]

Patente número 0 599 548 A1, Pilkington Glass Limited, gls/tm/37.

[tm38 3Rpat.b]

Patente número 0 599 547 A1, Pilkington Glass Limited, gls/tm/38.

[tm39 3Rupdate]

Pilkington 3R Technology: An Update, Shulver and Quirk, Ceram. Eng. Sci. Proc. 18 [1] (1997), gls/tm/39.

[tm40 ECFIA]

ECFIA Information Report on Environmental Performances of RCF Manufacturing Plants in Europe, ECFIA, December 1998, gls/tm/40.

[tm41 VDI 2578]

Verein Deutscher Ingenieure Guidelines (VDI 2578) Emission Control Glassworks (DRAFT), November 1997.

[tm42 filterdust]

Recycling of cullet and filter dust in the German glass industry, Schaeffer, Glastech. Ber. Glass Sci. Technol. 69 (1996) No. 4, gls/tm/42.

[tm43 SORGecon]

Comparison of ecological and economic aspects of a modern regenerative end-fired furnace and the second generation Sorg LoNOx Melter, Pieper, Platzer and Becher, Glastech. Ber. Glass Sci. Technol. 68 (1995) No. 7, gls/tm/43.

[tm44 Frits]

Ceramic Decorating Materials-Aspects of Product Stewardship, ANFFECC / CERAMICOLOR / EPSOM / VdMi, 1998, gls/tm/44.

[tm45 Illy]

Processes for heat recovery and energy savings in oxy-fired glass furnaces: a technology survey, Illy, Borders, Joshi, Zucchelli, Jurcik, International Glass Journal (1998) – No 96, gls/tm/45.

[tm46 ANFFECC]

Documento de Referencia de la Industria Española de Fritas para la Implementación de la Directiva IPPC 96/61/CE, Febrero 1999, gls/tm/46.

[tm47 BAT France]

Documento de referencia sobre MTD presentado a la Oficina Europea de IPPC, Ministerio Francés del Medio Ambiente, Febrero 1998, gls/tm/47.

[tm48 ADEME SOx]

Les techniques de désulfuration des procédés industriels, ADEME, 1999, gls/tm/48.

[tm50 HMIP Frit]

Pollution Control at Glass and Enamel Frit Plants, HMIP, September 1991, gls/tm/50.

[tm51 UBA]

Stand der Technik bei der glasherstellung, Umweltbundesamt - Austria, 1999, gls/tm/51.

[tm52 Karlsruhe]

Emission Control at stationary Sources in the Federal Republic of Germany Vol I +II – NOx, SOx and heavy metals, FGIER University of Karlsruhe (TH), August 1996, gls/tm/52.

[tm53 Gas Reburning]

Application of Gas Reburning Technology to Glass Furnaces for NOx Emissions Control, Moyeda Energy and Environmental Research Corporation, Irvine California, gls/tm/53.

[tm54 Gas Reburning2]

Glass Furnace NOx Control with Gas Reburn, Koppang and Moyeda, Energy and Environmental Research Corporation, Irvine California, gls/tm/54.

[tm55 Field Test]

Glass Furnace NOx Control with Gas Reburn The Field Test (draft article), Koppang, Marquez and Moyeda, Energy and Environmental Research Corporation, Irvine California, gls/tm/55.

[tm56 GazdeFrance]

Le Reburning: un bon moyen de réduction des émissions d'oxyes d'azote dans les fours de fusion de verre, Project Reburning Gaz, Gaz de France, December 1996, gls/tm/56.

[CPIV stats]

Informe de estadísticas CPIV presentado a la Reunión Conjunta de la Comisión Europea, Mayo 1998, Comité Permanent des Industries du Verre.

[EURIMA stats]

Informe de estadísticas EURIMA facilitado a la Oficina Europea de IPPC, Mayo 1998.

Asociación Europea de Fabricantes de Aislantes

[SORG Flex]

SORG Brochure on Flex Melter – “Discontinuous Production Constant Quality”, Nikolaus SORG GmbH & Co KG.

[SORG LoNOx]

SORG Brochure on LoNOx Melter, Nikolaus SORG GmbH & Co KG.

[ANFFECC]

BREF, Documento de Referencia para la Industria Española de Fritas (Borrador 1), ANFFECC, Octubre 1998.