

Guías sobre medio ambiente, salud y seguridad para la fabricación de vidrio

Introducción

Las guías sobre medio ambiente, salud y seguridad (MASS) son documentos de referencia técnica que contienen ejemplos generales y específicos de la práctica internacional recomendada para la industria en cuestión¹. Cuando uno o más miembros del Grupo del Banco Mundial participan en un proyecto, estas guías sobre MASS se aplican con arreglo a los requisitos de sus respectivas políticas y normas. Las presentes guías sobre MASS para este sector de la industria deben usarse junto con el documento que contiene las guías generales sobre MASS, en el que se ofrece orientación a los usuarios respecto de cuestiones generales sobre la materia que pueden aplicarse potencialmente a todos los sectores industriales. Los proyectos más complejos podrían requerir el uso de múltiples guías para distintos sectores de la industria. Para una lista completa de guías sobre los distintos sectores de la industria, visitar: <http://www.ifc.org/ifcext/sustainability.nsf/Content/EnvironmentalGuidelines>

Las guías sobre MASS contienen los niveles y los indicadores de desempeño que generalmente pueden lograrse en instalaciones nuevas, con la tecnología existente y a costos razonables. En lo que respecta a la posibilidad de aplicar estas

guías a instalaciones ya existentes, podría ser necesario establecer metas específicas del lugar así como un calendario adecuado para alcanzarlas.

La aplicación de las guías debe adaptarse a los peligros y riesgos establecidos para cada proyecto sobre la base de los resultados de una evaluación ambiental en la que se tengan en cuenta las variables específicas del emplazamiento, tales como las circunstancias del país receptor, la capacidad de asimilación del medio ambiente y otros factores relativos al proyecto. La decisión de aplicar recomendaciones técnicas específicas debe basarse en la opinión profesional de personas idóneas y con experiencia.

En los casos en que el país receptor tenga reglamentaciones diferentes a los niveles e indicadores presentados en las guías, los proyectos deben alcanzar los que sean más rigurosos. Cuando, en vista de las circunstancias específicas de cada proyecto, se considere necesario aplicar medidas o niveles menos exigentes que aquellos proporcionados por estas Guías sobre MASS, será necesario aportar una justificación exhaustiva y detallada de las alternativas propuestas como parte de la evaluación ambiental en un sector concreto. Esta justificación debería demostrar que los niveles de desempeño escogidos garantizan la protección de la salud y el medio ambiente.

Aplicabilidad

Las guías sobre MASS para la fabricación de vidrio incluyen información relevante para las instalaciones de fabricación de vidrio. No incluye la extracción de materias primas, cuestión que

¹ Definida como el ejercicio de la aptitud profesional, la diligencia, la prudencia y la previsión que podrían esperarse razonablemente de profesionales idóneos y con experiencia que realizan el mismo tipo de actividades en circunstancias iguales o semejantes en el ámbito mundial. Las circunstancias que los profesionales idóneos y con experiencia pueden encontrar al evaluar el amplio espectro de técnicas de prevención y control de la contaminación a disposición de un proyecto pueden incluir, sin que la mención sea limitativa, diversos grados de degradación ambiental y de capacidad de asimilación del medio ambiente, así como diversos niveles de factibilidad financiera y técnica.

se contempla en las guías sobre MASS para la extracción de materiales de construcción. El Anexo A contiene una descripción completa de las actividades de este sector industrial.

Este documento está dividido en las siguientes secciones:

- Sección 1.0: Manejo e impactos específicos de la industria
- Sección 2.0: Indicadores y seguimiento del desempeño
- Sección 3.0: Referencias y fuentes adicionales
- Anexo A: Descripción general de las actividades de la industria

1.0 Manejo e impactos específicos de la industria

La siguiente sección contiene una síntesis de las cuestiones relativas al medio ambiente, la salud y la seguridad asociadas a la fabricación de vidrio que tienen lugar durante la fase operacional, así como recomendaciones para su manejo. Por otra parte, en las guías generales sobre MASS se ofrecen recomendaciones sobre la gestión de las cuestiones de este tipo que son comunes a la mayoría de los grandes establecimientos industriales durante las etapas de construcción y de desmantelamiento.

1.1 Medio ambiente

Los problemas ambientales relacionados con la fabricación de vidrio son fundamentalmente los siguientes:

- Emisiones a la atmósfera
- Aguas residuales
- Residuos sólidos

Emisiones a la atmósfera

La fabricación de vidrio es una actividad que se realiza a altas temperaturas e intensiva en términos de energía, lo que provoca la emisión de subproductos de combustión (dióxido de azufre, dióxido de carbono y óxidos de nitrógeno) y la oxidación a altas temperaturas del nitrógeno atmosférico. Las emisiones de los hornos también pueden contener material particulado (MP) y reducidos niveles de metales. Los hornos de fusión generan entre un 80 y un 90 por ciento del total de emisiones de contaminantes a la atmósfera procedentes de las instalaciones de producción de vidrio. Las emisiones generadas durante las fases de formación y acabado están relacionadas con los distintos tipos de procesos de producción de vidrio. Las prensas en contenedor y máquinas de soplado generan la mayor parte de las emisiones mediante el contacto entre el

vidrio fundido (la “gota”) y lubricantes de equipos. La fabricación de vidrio plano, vidrio para envases, vajillas y la producción de vidrio artístico también generan emisiones relacionadas con la combustión durante el proceso de recocido, cuando el producto de vidrio se mantiene a 500–550°C en un proceso controlado de refrigeración en el “túnel de recocido” (horno de recocido).

Los productores deben estudiar la posibilidad de reducir el peso de los envases y las vajillas como una forma eficaz de reducir el impacto ambiental aumentando la cantidad de productos que pueden fabricarse a partir de un peso determinado de vidrio fundido.

Material particulado

Las partículas constituyen contaminantes significativos generados por las instalaciones de fabricación de vidrio. Todos los subsectores de la industria de fabricación de vidrio emplean materias primas en polvo y granuladas. El almacenamiento y la mezcla de materias primas son actividades comunes a todos los subsectores de la industria del vidrio. Las emisiones de polvo son consecuencia del transporte, la manipulación, el almacenamiento y la mezcla de materias primas. El polvo generado durante estos procesos suele ser más grueso que las partículas emitidas por los procesos en caliente, que registran un tamaño inferior a 1 µm, aunque las partículas pequeñas se aglutinan rápidamente para formar partículas de mayor tamaño. Mientras que el polvo emitido durante los procesos de manipulación constituye principalmente un problema para la seguridad y la higiene en el trabajo (OHS), los MP generados durante los procesos calientes en el taller de composición representan un posible problema ambiental.

Las principales técnicas de prevención y control recomendadas para reducir las emisiones de polvo y minimizar los posibles impactos derivados del transporte, manipulación, almacenamiento y mezcla de las materias primas incluyen:

- Separar las zonas de almacenamiento y composición de otras áreas operativas;
- Utilizar silos cerrados para almacenar los materiales de composición;
- Reducir el volumen de partículas finas en la mezcla mediante la humidificación con agua o con soluciones alcalinas (por ejemplo, hidróxido sódico, [NaOH], carbonato sódico [Na₂CO₃]) o por medio de la presinterización, el briqueteado o la paletización.
- Implementar prácticas adecuadas de carga y descarga;
- Transportar hasta los hornos las materias primas de la mezcla en transportadores cerrados;
- Aplicar controles en la zona de suministro del horno (p. ej. la humidificación de la mezcla; el funcionamiento equilibrado del horno para mantener una presión ligeramente positiva (<10 Pa) y aumentar la eficiencia de la combustión a la vez que se limita la posible emisión de polvo; la extracción de polvo mediante filtros; los dosificadores de hélice cerrados; y el cierre de la cámara de alimentación).

Las principales fuentes de emisiones de MP fina a la atmósfera como resultado del proceso de fusión consisten en la combinación de compuestos volátiles de la mezcla y flujo de fusión con óxidos de azufre empleados para producir compuestos que se condensan en forma de gases residuales de horno, la transferencia de materiales finos en la mezcla y la combustión de ciertos combustibles fósiles.

Las medidas de prevención y control para reducir las emisiones de partículas incluyen:

- Una mayor utilización del polvo de vidrio;
- La optimización del diseño y la geometría del horno para facilitar la reducción de la temperatura del horno;
- El uso de combustible con bajo contenido en azufre;

- La incorporación de consideraciones relativas a los patrones de carga del material, tamaño del grano y optimización de la humedad.

Una efectiva aplicación de las medidas básicas de control de partículas recién descritas puede causar concentraciones de emisiones de partículas de gas de horno metalúrgico inferiores a los 100 mg/Nm³. Las continuas emisiones de partículas aumentan con la edad del horno, dado que el deterioro del refractario exige incrementar el insumo de energía, y con él la velocidad de combustión de los productos en el horno.

Las técnicas de prevención y control al final de la canalización para reducir las emisiones de polvo incluyen la instalación de precipitadores electrostáticos (ESP) o de cámaras de filtros.² Los ESP pueden lograr una recogida general de polvo del 95 al 99 por ciento y alcanzar concentraciones de emisiones de 20 mg/m³. Sin embargo, su coste³ suele limitar su utilización en las instalaciones relativamente grandes de fabricación de vidrio con dos o más unidades de fusión donde existan economías de escala. El costo de los ESP y las cámaras de filtros puede variar enormemente y depende significativamente del desempeño requerido y del volumen de gas residual generado. Las cámaras de filtros se utilizan para volúmenes inferiores de gases residuales, normalmente de hasta 20.000 – 30.000 Nm³/h de gases de combustión, mientras que los ESP son más normales cuando se dan mayores índices de flujo de gases de combustión. Los sistemas de bolsas filtrantes (también

² La instalación de este tipo de unidades reductoras se considera la mejor técnica disponible según la legislación de la Unión Europea.

³ Los costos de inversión (incluida la depuración con gas ácido) se sitúan por lo general entre los €1,0 y €1,5 millones para un horno con capacidad para 50-100 ton/día (ya sean cámaras de filtros o ESP), y entre €2,5 y €3,5 millones para hornos con capacidad para 500 ton/día (normalmente ESP). Los costos anuales de explotación oscilan entre los €50.000 y €250.000 cuando el subproducto se reutiliza en el proceso de fusión, aunque esto requiere consistencia en términos de color. El costo de la eliminación de los subproductos es muy elevado y puede duplicar estos costos. Los costos de inversión para la instalación de tratamientos al final de la canalización suelen ser superiores en las plantas ya en funcionamiento que en las nuevas, especialmente cuando se tienen en cuenta las restricciones de espacio.

denominadas ‘cámaras de filtros’ o ‘filtros textiles’⁴ son también muy eficaces, con una eficacia de captación del 95 al 99 por ciento.

Óxido de nitrógeno

Las principales fuentes de emisión de óxido de nitrógeno (NO_x) son la generación de NO_x térmico provocada por las altas temperaturas del horno, la descomposición de los compuestos de nitrógeno en la mezcla de materiales y la oxidación del nitrógeno presente en los combustibles. Las modificaciones convencionales del proceso primario se basan normalmente en las siguientes técnicas o en una combinación de las mismas: Un índice reducido de aire / combustible, la combustión por fases, quemadores sellados de NO_x reducido y la elección de combustible. Una medida efectiva adicional consiste en operar los hornos en condiciones levemente reducidas.

Es importante minimizar el suministro de aire de combustión de los hornos para mejorar la eficiencia energética y limitar la formación de NO_x. Se recomienda por lo general mantener un 0,7–1 por ciento de O₂ en los hornos de fusión y un 1– 2 por ciento de O₂ en los hornos de llama longitudinal, medido a la salida de la cámara de combustión, y supervisar el nivel de monóxido de carbono (CO), que deberá mantenerse al mínimo (de 200–300 ppm a 1.000 ppm de CO como máximo).

Otras medidas básicas de proceso a tener en cuenta incluyen la selección de la fusión de oxigas (la cocción total o parcial de

O₂), descrita en el Anexo A, y la selección de hornos de NO_x reducido⁵.

Las técnicas de control de la contaminación al final de la canalización (secundarias) para reducir las emisiones de NO_x en la fabricación de vidrio, que deberían implementarse en aquellos casos en los que las medidas básicas no logren los niveles necesarios de NO_x, incluyen:

- La reducción química por combustible (p. ej. el proceso 3R);
- El uso de la reducción catalítica selectiva (RCS).

El uso de la reducción no catalítica selectiva (RNCS) no es una práctica habitual en la industria del vidrio. Las guías generales sobre MASS contienen información adicional sobre la aplicabilidad y el desempeño de los controles de emisiones de NO_x.

Óxido de azufre

La presencia de óxido de azufre (SO_x) en los gases residuales procedentes de los hornos de vidrio depende del contenido en azufre del combustible y del contenido en sulfito / sulfato / sulfuro de las materias primas, especialmente la adición de sodio o sulfato de calcio para la oxidación del vidrio.

⁴ Aunque las bolsas filtrantes resultan eficaces a temperaturas más bajas, el control de la temperatura es esencial. El control sirve para prevenir la corrosión provocada por la condensación de ácido generada por las bajas temperaturas y para garantizar la integridad del filtro frente a la destrucción térmica causada por temperaturas excesivamente elevadas. Las guías generales sobre MASS contienen información adicional sobre la aplicabilidad y desempeño de las técnicas de control de MP.

⁵ El diseño de algunos hornos nuevos de fusión incluye distintas opciones para reducir las emisiones de NO_x. Los hornos de NO_x reducido y FlexMelter se caracterizan por disponer de una salida posterior para los gases residuales en una zona del horno separada de la zona de combustión y destinada a crear las condiciones necesarias para la “combustión por fases”. Otra técnica es el “sistema en cascada”, que se produce en el puerto de combustión. La precombustión diferencial de una parte del combustible se produce antes de la fase de combustión final, lo que permite la combustión con aire comburente con un menor porcentaje de O₂. Este tipo de tecnología suele ser más cara que las soluciones tradicionales de combustión y debería compararse con los costos y eficiencias de otros hornos que disponen de una estructura convencional y sistemas de reducción al final de la canalización.

Las técnicas de control de la contaminación recomendadas para reducir las emisiones de dióxido de azufre (SO₂) incluyen, entre otras:

- El uso de combustibles con bajo contenido en azufre y, en particular, de gas natural;
- La reducción en la cantidad de sodio o sulfato de calcio en la mezcla de materiales.

Por lo general, cuando se emplea gas natural como combustible, el nivel de SO_x en los gases de escape es reducido. En caso de querer reducir aún más las emisiones de gas ácido, se utilizará por ejemplo un combustible que contenga azufre, pudiendo emplear las siguientes técnicas:

- Un lavador seco en el que se inyectan materiales basados en calcio o sodio⁶ en los productos de la corriente de gases de combustión antes de filtrar los gases residuales;
- La instalación de lavadores semihúmedos (lavadores reactivos o reactores de enfriamiento), que se caracterizan por añadir algunas sustancias químicas reactivas básicas (de calcio y sodio) que se disuelven en el agua de lavado (reducción en húmedo).

Cuando se emplea el proceso de absorción en seco (como sucede con la reducción del SO₂ y / o del cloruro de hidrógeno [HCl] o el fluoruro de hidrógeno [HF] con bicarbonato de sodio [NaHCO₃] o cal hidratada [Ca(OH)₂]), las bolsas filtrantes suelen ser más eficaces que los ESP, dado que cuentan con una superficie de contacto más amplia y un prolongado tiempo de contacto sólido-gas.

⁶ El compuesto de sodio más común es el bicarbonato sódico (NaHCO₃), empleado en estado seco en el proceso NEUTREC. El NaHCO₃ se tritura en un molino para reducir su tamaño a menos de 15 µm y luego se añade a la corriente de gases residuales. A temperaturas superiores a los 107°C (normalmente por encima de los 140°C), el NaHCO₃ se descompone en carbonato de sodio (Na₂CO₃) y agua. La capacidad del Na₂CO₃ "nativo" con amplias superficies para reaccionar a los compuestos ácidos es elevada. Esta reactividad reduce la cantidad de químicos reactivos y por consiguiente de subproductos.

Cloruros y fluoruros

Estos contaminantes se presentan en los gases residuales generados por los hornos de fusión de vidrio debido a las impurezas de las materias primas, y su volumen es normalmente limitado. Las principales excepciones se producen en la fabricación de fibra de vidrio opal (opaco) y continua, donde los niveles de fluoruro / HF antes de la mitigación puede alcanzar los 1.000 mg/Nm³ o más debido a la adición de espato flúor a la mezcla. Las técnicas de lavado secas o semisecas suelen emplearse para tratar las emisiones de HF. Cuando el vidrio es particularmente agresivo (p. ej. opal debido a la presencia de fluorina), el uso de un horno eléctrico se considera como la mejor elección.

A excepción de la fabricación de vidrios especiales, las fuentes de emisiones de HCl y HF están relacionadas normalmente con las impurezas presentes en las materias primas (p. ej. sodio o cloruro cálcico) y, con menos frecuencia, con la presencia de pequeñas cantidades de fluoruro de calcio (CaF₂) en la mezcla. Las emisiones tanto de HF como de HCl pueden controlarse recurriendo a las técnicas de reducción descritas anteriormente para las emisiones de SO₂.

Metales

La emisión de metales es una cuestión importante en ciertos subsectores (p. ej. la producción de vidrio de plomo y vidrio sinterizado), aunque este problema se da en menor medida en todos los demás sectores de fabricación de vidrio. Los metales pesados pueden estar presentes en forma de impurezas menores en algunas materias primas, en el polvo de vidrio y en los combustibles. El plomo y el cadmio se utilizan en los fundentes y agentes colorantes en la industria de vidrio sinterizado. Las partículas generadas durante la fabricación del vidrio de plomo pueden registrar un contenido en plomo del 20–60 por ciento. La fabricación de vidrio especial puede generar arsénico, antimonio y selenio (el agente colorante en el vidrio

bronce o el agente decolorante en algunos vidrios transparentes).

Deben utilizarse técnicas de reducción de polvo de elevada eficacia para disminuir las emisiones de partículas que contengan metales. La contención de las emisiones gaseosas de metales (p. ej. cuando se emplea selenio) se realiza mediante la instalación de lavadores secos y semisecos en combinación con las técnicas de reducción de polvo.

Gases de efecto invernadero (GEI)

La fabricación de vidrio constituye una fuente significativa de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), especialmente de dióxido de carbono (CO₂). La producción de 1 kg de vidrio en un horno a gas genera aproximadamente 0,6 kg de CO₂, de los cuales 0,45 kg proceden de la combustión de combustibles fósiles y 0,15 kg de la disociación de materias primas carbonatadas (CaCO₃ y dolomita) empleadas en la mezcla. La producción de GHG depende directamente del tipo de vidrio, la clase de combustibles fósiles empleados, la eficiencia del proceso en términos de energía y el uso de polvo de vidrio. Las exigencias de calidad para ciertos productos de vidrio (p. ej. los productos farmacéuticos y cosméticos, los productos de laboratorio y alumbrado) limitan el uso de polvo de vidrio.

Además de las estrategias de manejo recomendadas para los GHG en las guías generales sobre MASS, los métodos específicos para prevenir y controlar las emisiones de GEI incluyen:

- Adoptar medidas para aumentar la eficiencia en términos de energía (descritas a continuación);
- Emplear combustibles de bajo contenido en carbono (p. ej. gas natural, siempre que sea posible, en vez de fuelóleo o de combustibles fósiles sólidos);
- Maximizar el uso de polvo de vidrio para incrementar la eficiencia en términos de energía y limitar el uso de

materias primas carbonatadas, especialmente en la producción de vidrio para envases. La posibilidad de aprovechar una gran proporción del polvo de vidrio en la mezcla es particularmente elevada durante la fabricación de envases de color verde. El uso de energía de los hornos se reduce normalmente en un 0,15–0,3 por ciento de polvo de vidrio en la mezcla⁷.

- Utilizar cambiadores de velocidad basados en inversor con grandes ventiladores de aire de combustión y de refrigeración.
- Recuperar el calor residual de los gases de combustión del horno: El calor puede emplearse para precalentar la mezcla o el polvo de vidrio (ver más abajo) o para proporcionar calor o vapor para la calefacción de locales. Una tecnología incipiente consiste en recuperar calor en forma de vapor a alta presión que puede expandirse en una turbina para generar electricidad.
- Las técnicas para incrementar la eficiencia de los hornos incluyen:⁸
 - *La capacidad del horno*: los hornos cuya producción no supera las 50 toneladas / día registran elevadas pérdidas estructurales en relación con la energía empleada en la fusión del vidrio y son por consiguiente ineficaces;
 - *La elección de la técnica de fusión*: los hornos de regeneración son más eficientes en términos de energía que los hornos con recuperación, debido al precalentamiento más elevado del aire de combustión;
 - La adopción de técnicas y materiales avanzados de aislamiento;
 - Medidas para controlar la combustión;
 - La maximización del uso de polvo de vidrio;

⁷ En la Unión Europea (UE), el uso de polvo de vidrio en la producción de vidrio para envases oscila entre un < 20 % a un >90 %, siendo el promedio de la UE en la región el 48 % y en el vidrio ámbar del 25 – 60 %.

⁸ UE BREF (2001).

- El precalentamiento de la mezcla y el polvo de vidrio antes de acceder al horno mediante la recuperación del calor residual procedente de los gases de combustión del horno.

Aguas residuales

Aguas residuales de procesos industriales

El uso más significativo de agua se produce durante la refrigeración y la limpieza del polvo de vidrio. Las emisiones acuosas consisten en purgas de los sistemas de refrigeración por contacto, aguas de limpieza y escorrentía de aguas superficiales. Deben utilizarse sistemas cerrados de aguas de proceso para minimizar las pérdidas. El volumen de efluentes líquidos generado durante la fabricación de vidrio es marginal en comparación con otros sectores industriales y se limita a ciertos procesos (p. ej. el enfriamiento de gotas de vidrio fundido y cizallas enfriadas con agua). Las descargas pueden verse afectadas por sólidos de vidrio, algunos materiales solubles empleados en la fabricación de vidrio (p. ej. sulfato sódico), algunos compuestos orgánicos provocados por el aceite lubricante empleado en el proceso de corte y sustancias químicas usadas en el tratamiento (p. ej. sales disueltas y sustancias químicas para el tratamiento del agua) del sistema de refrigeración del agua.

Tratamiento de aguas residuales de procesos

Algunas de las técnicas de tratamiento de las aguas residuales generadas por procesos industriales en este sector son: la compensación de flujo y carga con ajuste de pH; la sedimentación para reducir los sólidos en suspensión mediante el uso de balsas o depósitos de decantación; el filtrado multimedia para reducir los sólidos en suspensión no sedimentables; la separación del agua y la eliminación de los residuos en vertederos o, si esto resulta peligroso, en sitios de eliminación de desechos creados a tal fin. Pueden requerirse

controles de ingeniería adicionales y fases de pretratamiento para tratar el agua de refrigeración de metales, sales disueltas, sustancias orgánicas y agentes químicos de tratamiento del agua.

En las guías generales sobre MASS se explica la gestión de aguas residuales industriales y se ofrecen ejemplos de enfoques para su tratamiento. Mediante el uso de estas tecnologías y técnicas recomendadas para la gestión de aguas residuales, los establecimientos deberían cumplir con los valores para la descarga de aguas residuales que se indican en el cuadro correspondiente de la Sección 2 del presente documento para la industria gráfica. El procesamiento mecánico del vidrio precisa el reciclado de las aguas de proceso.

Consumo de agua y otras corrientes de aguas residuales

En las guías generales sobre MASS se dan orientaciones sobre el manejo de aguas residuales no contaminadas procedentes de operaciones de servicios públicos, aguas pluviales no contaminadas y aguas de alcantarillado. Las corrientes contaminadas deberían desviarse hacia el sistema de tratamiento de aguas residuales de procesos industriales. Las recomendaciones para reducir el consumo de agua, especialmente en aquellos sitios en que pueda ser un recurso natural escaso, se analizan en las guías generales sobre MASS.

Residuos sólidos

La mayoría de las actividades de la industria del vidrio producen niveles relativamente bajos de residuos. La fabricación de vidrio genera residuos sólidos principalmente en las zonas de transporte. La limpieza y el mantenimiento en las zonas de recepción pueden reducir estos residuos y permitir que los vertidos de materiales se recojan y añadan a las materias primas. La pavimentación de las áreas de recepción facilita una

recogida y limpieza eficiente y efectiva y permite asimismo identificar adecuadamente el material vertido, así como su segregación y reciclado en el proceso.

Los residuos sólidos de proceso derivados del proceso de fusión incluyen polvo procedente de los regeneradores (o recuperadores) que se elimina durante la limpieza mecánica o térmica, y los materiales residuales refractarios generados durante el mantenimiento periódico, la reparación y el desmantelamiento de los hornos (aproximadamente 500–2.000 toneladas / operación, normalmente cada 5–15 años), incluidos refractarios ricos en cromo y circonio. Otros residuos incluyen polvo recogido de los equipos reductores.

Las técnicas recomendadas para prevenir la contaminación incluyen:

- Maximizar el uso de polvo de vidrio como materia prima;
- Reciclar los residuos refractarios como materia prima para la fabricación de ladrillos (esta técnica no afecta a la calidad del producto final);
- Sustituir los ladrillos refractarios normalmente cada 6–12 años (el reciclaje adecuado de estos materiales representa una oportunidad para prevenir la contaminación que debe definirse durante la reconstrucción y reparación del horno / alimentador);
- Reutilizar el polvo recogido en la mezcla, siempre que el color lo permita.

1.2 Higiene y seguridad en el trabajo

Los riesgos más notables para la higiene y la seguridad en el trabajo se producen durante la fase operativa de los proyectos de fabricación de vidrio, incluyendo principalmente:

- Exposición al calor
- Exposición al ruido
- Exposición a riesgos respiratorios

- Riesgos físicos
- Riesgos de electrocución

Calor

La exposición al calor puede producirse durante las fases de funcionamiento o mantenimiento de los hornos u otras máquinas que generan calor. Algunas de las medidas de prevención y control recomendadas consisten en:

- Minimizar el tiempo requerido para trabajar en entornos de altas temperaturas ambiente mediante la implementación de turnos de menor duración en estos lugares;
- Para prevenir el exceso de calor en el lugar de trabajo, instalar sistemas de ventilación y refrigeración del aire que eliminen los humos y el polvo en los lugares de trabajo;
- Suministrar y utilizar cuando sea necesario respiradores de aire o O₂;
- Proteger las superficies donde se prevea la proximidad y el contacto de los trabajadores con los equipos calientes y utilizar equipos de protección personal (EPP) cuando sea necesario, incluidos guantes y calzado aislante.

Ruido

Los trabajadores pueden estar expuestos al ruido durante la fabricación del vidrio. La pérdida de audición (hipoacusia) es una enfermedad ocupacional típica de esta industria, especialmente en la fabricación de vidrio para envases. Durante el proceso de formación del vidrio para envases, la alta presión empleada en el proceso de enfriamiento de moldes puede provocar niveles de ruido significativos. El nivel de ruido generado por las máquinas de prensado de vidrio puede alcanzar los 100 decibelios o más, pudiendo provocar pérdidas de audición. Las recomendaciones para prevenir y controlar la exposición al ruido, incluido el uso de protectores del oído y otros EPP, se describen en las guías generales sobre MASS.

Riesgos para el aparato respiratorio

(Exposición al polvo, humos y compuestos tóxicos)

Los riesgos para la salud en el trabajo en la fabricación del vidrio pueden estar relacionados con la presencia en el trabajo de MP finos en el aire. Estos MP pueden contener polvo de silicio, derivado de las arenas de silicio y feldespato y, en ocasiones, compuestos tóxicos (p. ej. óxido de plomo, boro, arsénico, estaño, níquel, cobalto). Los lugares de trabajo en las instalaciones de fabricación de vidrio para envases y vajillas también contienen normalmente humo de aceite generado durante la lubricación de los moldes en caliente. Las partículas derivadas de la fabricación del vidrio de plomo pueden alcanzar contenidos en plomo del 20–60 por ciento. Ciertos procesos de fabricación de vidrio especial pueden generar elevados niveles de HCl, HF, arsénico, antimonio y selenio en el lugar de trabajo.

El tratamiento de las superficies calientes puede requerir el uso de compuestos de estaño y de titanio, como son el cloruro de estaño o los compuestos orgánicos de estaño clorado, que pueden generar emisiones de polvo rico en estaño, titanio y HCl. Algunas de las técnicas recomendadas para prevenir y controlar la exposición son:

- Separar las zonas de almacenamiento y composición de materias primas de otras áreas operativas;
- Implementar prácticas adecuadas de carga y descarga;
- Transportar el material de mezcla hasta los hornos mediante transportadores / tubos cubiertos;
- Emplear sistemas de ventilación.

Riesgos físicos

Las lesiones oculares provocadas por partículas de vidrio roto y partículas desprendidas del vidrio son un riesgo habitual en la fabricación de vidrio y deben prevenirse mediante el uso universal de gafas protectoras para todos los trabajadores y

visitantes. La rotura de vidrio plano durante su manipulación puede provocar cortes más graves. El riesgo de lesiones debe minimizarse mediante la automatización de la manipulación del vidrio plano y el suministro de guantes resistentes a los cortes y mandiles largos a los trabajadores que manipulen vidrio plano.

Riesgos de electrocución

Los trabajadores pueden estar expuestos a riesgos de electrocución debido a la presencia de equipos eléctricos en las plantas de fabricación de vidrio. En las guías generales sobre MASS se ofrecen recomendaciones para prevenir y controlar la exposición a los riesgos de electrocución.

1.3 Higiene y seguridad en la comunidad

Los impactos en la higiene y seguridad de la comunidad durante la construcción, puesta en funcionamiento y desmantelamiento de las plantas de fabricación de vidrio son comunes a los de la mayoría de las demás instalaciones industriales y se analizan en las guías generales sobre MASS.

2.0 Indicadores y seguimiento del desempeño

2.1 Medio ambiente

Guías sobre emisiones y efluentes

En los Cuadros 1 y 2 se presentan las guías sobre emisiones y efluentes para este sector. Las cantidades correspondientes a las emisiones y efluentes de los procesos industriales en este sector son indicativas de las prácticas internacionales recomendadas para la industria, reflejadas en las normas correspondientes de los países que cuentan con marcos normativos reconocidos. Dichas cantidades pueden alcanzarse en condiciones normales de funcionamiento de instalaciones adecuadamente diseñadas y utilizadas mediante la aplicación de las técnicas de prevención y control de la contaminación que se han analizado en las secciones anteriores de este documento. Estos niveles se deben lograr, sin dilución, al menos el 95% del tiempo que opera la planta o unidad, calculado como proporción de las horas de operación anuales. El incumplimiento de estos niveles debido a las condiciones de determinados proyectos locales se debe justificar en la evaluación ambiental correspondiente.

Las guías sobre efluentes se aplican a los vertidos directos de efluentes tratados a aguas superficiales de uso general. Los niveles de vertido específicos del emplazamiento pueden establecerse basándose en la disponibilidad y condiciones de los sistemas de tratamiento y recogida de aguas de alcantarillado público o, si se vierten directamente a las aguas superficiales, basándose en la clasificación del uso del agua receptora que se describe en las guías generales sobre MASS.

Las guías sobre emisiones son aplicables a las emisiones procedentes de la combustión. Las guías sobre emisiones procedentes de la combustión relacionadas con centrales de

generación de vapor y energía a partir de fuentes con una capacidad igual o inferior a 50 MW se analizan en las guías generales sobre MASS, y las guías sobre emisiones procedentes de centrales de mayor capacidad se analizan en las guías sobre MASS para centrales térmicas. En las guías generales sobre MASS se proporciona orientación sobre cuestiones ambientales teniendo en cuenta la carga total de emisiones.

Cuadro 1. Niveles de emisiones a la atmósfera para la fabricación de vidrio

Contaminantes	Unidades	Valor indicativo
Partículas		
Gas natural	mg/Nm ³	100 ^a
Otros combustibles		50 ^a
SO ₂	mg/Nm ³	700–1.500 ^b
NO _x	mg/Nm ³	1.000
HCl	mg/Nm ³	30
Fluoruros	mg/Nm ³	5
Plomo	mg/Nm ³	5
Cadmio	mg/Nm ³	0,2
Arsénico	mg/Nm ³	1
Otros metales pesados (total)	mg/Nm ³	5 ^c

^a En presencia de metales tóxicos, no deberá exceder los 20 mg/Nm³. Para alcanzar emisiones de polvo de 50 mg/Nm³ será necesario instalar tratamientos secundarios (bolsas filtrantes o precipitadores electrostáticos). Unas buenas condiciones operativas del horno y la adopción de medidas primarias permiten alcanzar niveles de emisiones de 100 mg/Nm³.

^b 700 mg/Nm³ para el calentamiento con gas natural. 1.500 mg/Nm³ para el calentamiento con petróleo.

^c 1 mg/Nm³ para el selenio.

Cuadro 2. Niveles de efluentes para la fabricación de vidrio

Contaminantes	Unidades	Valor indicativo
PH	S.U.	6–9
Sólidos en suspensión totales	mg/L	30
COD	mg/L	130
Aceite y grasa	mg/L	10

Plomo	mg/L	0,1
Antimonio	mg/L	0,3
Arsénico	mg/L	0,1
Fluoruros	mg/L	5
Ácido bórico	mg/L	2
Aumento de temperatura	°C	<3 ^a

a Al borde de una zona de mezcla científicamente establecida que toma en cuenta la calidad del agua ambiente, el uso del agua receptora, los receptores potenciales y la capacidad de asimilación.

Seguimiento ambiental

Se implementarán programas de seguimiento ambiental en este sector para hacer frente a todas aquellas actividades que puedan entrañar impactos significativos para el medio ambiente durante las operaciones normales y en condiciones alteradas. Las actividades de seguimiento ambiental se basarán en indicadores directos e indirectos de emisiones, efluentes y uso de recursos aplicables al proyecto concreto.

La frecuencia del seguimiento debería permitir obtener datos representativos sobre los parámetros objeto del seguimiento. El seguimiento deberá recaer en individuos capacitados, quienes deberán aplicar los procedimientos de seguimiento y registro y utilizar un equipo adecuadamente calibrado y mantenido. Los datos de seguimiento se analizarán y revisarán con regularidad, y se compararán con las normas vigentes para así adoptar las medidas correctivas necesarias. Las guías generales sobre MASS contienen orientaciones adicionales sobre los métodos de muestreo y análisis de emisiones y efluentes.

Uso de recursos y cargas de emisiones

Los cuadros 3 y 4 contienen ejemplos de indicadores de consumo de recursos para la energía y el agua, además de la carga de emisiones en este sector. Los valores de referencia de la industria se consignan únicamente con fines comparativos, y cada proyecto debería tener como objetivo lograr mejoras continuas en estas áreas.

Cuadro 3. Consumo de recursos y energía^{a,d}

Insumos por unidad de producto	Unidad	Indicador del sector
Combustibles Consumo específico de combustibles para los hornos de regeneración de vidrio para envases y hornos de llama longitudinal con una producción de > 200 ton/día	GJ/tonelada fundida	3,9 ^b
Consumo específico de combustible para los hornos de vidrio flotado con una producción de 400–500 ton/día	GJ/tonelada fundida	5,5
Consumo específico de combustible para los hornos de vidrio borosilicatado con una producción de 10–15 ton/día	GJ/tonelada fundida	9
Electricidad Uso específica de electricidad	kWh/tonelada fundida	110
Agua Consumo de agua por unidad de producción	m ³ /tonelada fundida	4 ^c

^a El consumo específico de energía está muy relacionado con las dimensiones del horno, la capacidad de producción de vidrio, la carga, edad y utilización de polvo de vidrio. Los hornos pequeños y los hornos que operan por debajo de su capacidad nominal suelen ser menos eficientes en términos de energía, ya que las pérdidas específicas de calor son elevadas. El consumo de energía también depende de la calidad del vidrio (temperatura de fusión), porcentaje de polvo de vidrio y edad del horno. El valor inferior del margen señalado corresponde a los nuevos hornos que recurren a la maximización del uso de polvo de vidrio, buen aislamiento del horno y buenas condiciones operativas (es decir, temperaturas operativas no excesivas y un buen control de la combustión). Las cifras de uso de combustible no tienen en cuenta el refuerzo eléctrico.

^b Los consumos específicos de energía para los hornos de regeneración y hornos de oxígeno sin producción de O₂ y para la producción de vidrio para envases son inferiores en los hornos con recuperación y para la producción de vidrio plano y vajillas.

^c Valores disponibles para la fabricación de fibra de vidrio.

^d En la fabricación de vidrio sódico-cálcico, un incremento del 10 por ciento en el polvo de vidrio permite reducir el consumo de energía hasta un 3 por ciento, oscilando entre los 22 y 30 kcal/kg (0,09–0,13 GJ/ton).

Cuadro 4. Generación de emisiones

Residuos por unidad de producto ^a	Unidad	Indicador del sector	
		Hornos de vidrio plano	Hornos de vidrio para envases
Material particulado	kg/tonelada de vidrio fundido	0,02–0,1	0,002–0,22
	mg/Nm ³	5,0–40	1–35
NO _x	kg/tonelada de vidrio fundido	1,1–2,9	<0,75
	mg/Nm ³	495–1.250	<400
SO _x	kg/tonelada de vidrio fundido	0,54–4,0	0,2–3,5
	mg/Nm ³	200–1.700	100–1.650
HCl	kg/tonelada de vidrio fundido	<0,01–0,08	0,01–0,07
	mg/Nm ³	4,0–30	7–30
HF	kg/tonelada de vidrio fundido	<0,002–0,01	≤0,02
	mg/Nm ³	<1,0–4,0	≤1–6
Metales	kg/tonelada de vidrio fundido	<0,001	<0,001
	mg/Nm ³	<1,0	<1,0

^a Datos proporcionados por la Unión Europea (2005) empleando técnicas primarias y secundarias de reducción. Los datos se refieren a los hornos a gas y aceite.

2.2 Higiene y seguridad en el trabajo

Guía sobre higiene y seguridad en el trabajo

Para evaluar el desempeño en materia de higiene y seguridad en el trabajo deben utilizarse las guías sobre exposición que se publican en el ámbito internacional, entre ellas: guías sobre la concentración máxima admisible de exposición profesional (TLV®) y los índices biológicos de exposición (BEIs®)

publicados por la American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH)⁹, la Guía de bolsillo sobre riesgos químicos publicada por el Instituto Nacional de Higiene y Seguridad en el Trabajo de los Estados Unidos (NIOSH)¹⁰, los límites permisibles de exposición publicados por la Administración de Seguridad e Higiene en el Trabajo de los Estados Unidos (OSHA)¹¹, los valores límite indicativos de exposición profesional publicados por los Estados miembros de la Unión Europea¹² u otras fuentes similares.

Tasas de accidentes y letalidad

Deben adoptarse medidas para reducir a cero el número de accidentes entre los trabajadores del proyecto (ya sean empleados directos o personal subcontratado), especialmente los accidentes que pueden causar la pérdida de horas de trabajo, diversos niveles de discapacidad e incluso la muerte. Como punto de referencia para evaluar las tasas del proyecto puede utilizarse el desempeño de instalaciones en este sector en países desarrollados, que se obtiene consultando las fuentes publicadas (por ejemplo, a través de la Oficina de Estadísticas Laborales de los Estados Unidos y el Comité Ejecutivo de Salud y Seguridad del Reino Unido)¹³.

Seguimiento de la higiene y la seguridad en el trabajo

Es preciso realizar un seguimiento de los riesgos que pueden correr los trabajadores en el entorno laboral del proyecto concreto. Las actividades de seguimiento deben ser diseñadas y realizadas por profesionales acreditados¹⁴ como parte de un programa de seguimiento de la higiene y la seguridad en el

⁹ Disponibles en: <http://www.acgih.org/TLV/> y <http://www.acgih.org/store/>

¹⁰ Disponible en: <http://www.cdc.gov/niosh/npg/>

¹¹ Disponibles en: http://www.osha.gov/pls/oshaweb/owadisp.show_document?p_table=STANDARDS&p_id=9992

¹² Disponibles en: http://europe.osha.eu.int/good_practice/risks/ds/oel/

¹³ Disponibles en: <http://www.bls.gov/iif/> y <http://www.hse.gov.uk/statistics/index.htm>.

¹⁴ Los profesionales acreditados pueden incluir a higienistas industriales certificados, higienistas ocupacionales diplomados o profesionales de la seguridad certificados o su equivalente.

trabajo. En las instalaciones, además, debe llevarse un registro de los accidentes y enfermedades laborales, así como de los sucesos y accidentes peligrosos. Las guías generales sobre MASS contienen orientaciones adicionales sobre los programas de seguimiento de la higiene y la seguridad en el trabajo.

3.0 Referencias y fuentes adicionales

Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (US EPA). 2005. Normas de Funcionamiento para Nuevas Fuentes Estacionarias. Subparte CC – Standards of Performance for Glass Manufacturing Plants, CFR 40, Parte 60. Washington, DC.

Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (US EPA). 2004. Normas Nacionales de Emisión para Contaminantes Peligrosos del Aire. Subparte N – National Emission Standards for Inorganic Arsenic Emissions from Glass Manufacturing Plants, CFR 40, Parte 61. Washington, DC.

Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (US EPA). 1995a. AP-42 Sección 11.15, Glass Manufacturing. Washington, DC.

Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (US EPA), Oficina de Cumplimiento. 1995b. Profile of the Stone, Clay, Glass and Concrete Products Industry. Proyecto de Agenda de Sectores. Washington, DC.

Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (US EPA). 1995c. Glass Manufacturing Point Source Category. Subparte E – Float Glass Manufacturing Subcategory, CFR 40, Parte 426. Washington, DC.

Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (US EPA). 1995. CFR 40 Parte 426. Glass Manufacturing Point Source Category. Subparte H – Glass Container Manufacturing Subcategory, CFR 40, Parte 426. Washington, DC.

Comisión Europea. 2001. Prevención y Control Integrados de la Contaminación (IPPC) Documento de referencia sobre las mejores técnicas disponibles en la industria del vidrio. Sevilla, España.

Departamento de Trabajo de Estados Unidos, Oficina de Estadísticas Laborales. 2003 y 2004. Nonfatal Occupational Injuries and Illnesses for Glass and Glass Product Manufacturing (Código 327200) and for Glass Container Manufacturing (Código 327213). Washington, DC.

Estado de Nueva Jersey, Departamento de Protección Ambiental, Air Quality Permitting Program. 1997. State of the Art (SOTA) Manual for the Glass Industry Section 3.15. Trenton, Nueva Jersey.

Eurosil. 2005. Potential Socio-Economic Effects of Setting an EU Occupational Exposure Limit for Respirable Crystalline Silica.

Gobierno de Australia. Departamento de Medio Ambiente y Patrimonio. 2004. Emissions Estimation Technique Manual for Glass and Glass Fibre Manufacturing — Versión 2.0. Canberra, Australia.

Organización Internacional del Trabajo (OIT). 2001. Seguridad en el uso de lanas aislantes de fibra de vidrio. Ginebra, Suiza.

UNECE/EMEP Task Force on Emission Inventories and Projections. 2005. EMEP/CORINAIR Guía de Inventario de Emisiones — 2005. Glass Production. Actividades 030314-030317 & 040613. Agencia Europea de Medio Ambiente. Copenhague, Dinamarca.

Unión Europea. 2005. Corinair. Guía de Inventario de Emisiones.

Anexo A: Descripción general de las actividades de la industria

La industria del vidrio abarca una amplia gama de instalaciones de fabricación y productos. Este sector produce objetos de vidrio a partir de una amplia gama de materias primas, entre las que destaca la arena de silicio, el polvo de vidrio y materiales intermedios / modificantes como el carbonato sódico, el carbonato cálcico, la dolomita y el feldespato. La disponibilidad de las materias primas es un aspecto importante en el diseño conceptual y ubicación de la planta. Las notables cantidades de materias primas de bajo costo necesarias y el valor específico relativamente bajo de los productos fabricados son factores fundamentales para seleccionar un emplazamiento adecuado de la planta que reduzca las distancias de transporte de las principales materias primas y los productos. Esto resulta especialmente relevante en la fabricación de vidrio para envases, que es el mayor sector en la industria del vidrio.

Más del 90 por ciento de los productos de la industria se vende a otras industrias. La fabricación del vidrio depende fundamentalmente del sector de la construcción, la fabricación de vehículos y la industria de bebidas. Sin embargo, existen sectores de menor volumen que producen bienes de elevado valor técnico o de consumo. El sector del vidrio especial engloba a distintos subsectores como son el de tubos de rayos catódicos y rayos X, vidrio para alumbrado (tubos y bombillas), vidrio para productos electrónicos y tecnología electrónica, sellos y aislantes de vidrio, vidrio borosilicatado (envases farmacéuticos y utensilios de cocina), vidrios ceramizados, vidrio óptico, vidrio celular, ladrillo de vidrio y vidrio artístico.

Una vez recibidos la arena, el carbonato cálcico, el carbonato sódico y otras materias primas, se almacenan en tanques diferenciados. Antes de fundirse, las materias primas se transfieren a un sistema de peso y mezcla donde se mezclan con el polvo de vidrio para garantizar la homogeneidad necesaria. La mezcla se transporta hasta un tanque de

almacenamiento de mezclas, donde se conserva hasta suministrarse al horno de fusión. El horno de fusión calienta las materias primas a temperaturas que oscilan entre los 1.500°C y 1.650°C, lo que, mediante una serie de reacciones químicas, transforma los materiales en vidrio fundido. El vidrio fundido se retira del horno y se acondiciona térmicamente en el “alimentador” para garantizar las mejores características de moldeado en las sucesivas etapas de trabajo. Una vez concluido el proceso de formación, el vidrio se recuece en el “túnel de recocido” para eliminar la tensión no deseada del vidrio formado, seguido de una fase de inspección y pruebas. Durante la fase de envasado final, el producto acabado se prepara para su almacenamiento o transporte. El proceso típico de fabricación de vidrio se ilustra en el Gráfico 1-A.

Materias primas

Los distintos subsectores de vidrio y las plantas individuales emplean una amplia gama de materias primas. Las principales materias primas incluyen materiales empleados en la formación del vidrio (p. ej. arena de silicio, polvo de vidrio), materiales intermedios / modificantes (p. ej. carbonato sódico, carbonato cálcico, feldespato y dolomita) y agentes colorantes / decolorantes (p. ej. cromitas, óxido de hierro, óxido de cobalto, selenio y selenito de cinc). Para la fabricación de vidrio especial y técnico, se emplean óxido de plomo, potasa, óxido de cinc y otros óxidos de metal. Los agentes afinados incluyen arsénico y óxido de antimonio, nitratos y sulfatos. Entre tres y cuatro materias primas representan más del 95 por ciento de las materias primas empleadas en la industria de fabricación de vidrio (arena, carbonato sódico, carbonato cálcico y dolomita). No obstante, se emplean distintas materias primas en los materiales de formación de vidrio, materiales intermedios y modificantes, y agentes colorantes.

Consumo de energía y combustibles

La fabricación de vidrio es una actividad intensiva en términos de energía y resulta fundamental adoptar medidas de eficiencia energética, especialmente en la fase de diseño de los hornos de fusión. El proceso de fusión es la fase más intensiva en términos de energía, lo que supone entre un 60 y un 80 por ciento del consumo total de energía en la fabricación de vidrio. Las características del horno (especialmente, el tipo y el tamaño) afectan al rendimiento específico de energía. Otros usuarios de energía en la fabricación de vidrio son los alimentadores, el proceso de formación, el recocido y la calefacción de la fábrica entre otros. Los ventiladores de aire de combustión y refrigeración emplean un volumen notable de electricidad. Las medidas destinadas a reducir el peso del producto, especialmente en el caso del vidrio para envases, permiten reducir el consumo de energía y las emisiones a la atmósfera por unidad de producto. Esto puede lograrse mediante la optimización del diseño, la optimización del proceso de formación y la implementación de tratamientos posteriores a la formación.

Proceso de fusión

La elección de la fuente de energía, la técnica de calentamiento y el método de recuperación del calor es fundamental para el diseño de los hornos de fundido de vidrio. Estas decisiones son uno de los factores más importantes para el desempeño ambiental y la eficiencia en términos de energía de la operación de fusión, y por consiguiente de la eficiencia energética de todo el proceso de producción de vidrio. Los hornos de fusión de vidrio se clasifican según su fuente de combustible y método de aplicación de calor en cuatro clases: hornos de regeneración, hornos con recuperación, recuperadores continuos y hornos eléctricos. Los hornos de recuperación, regeneración y recuperadores continuos pueden funcionar con gas, aceite y combustibles sólidos pulverizados. Los combustibles usados son un factor importante en términos de GEI, partículas y

emisiones de SO₂. En la elección de los combustibles, se tendrán en cuenta aspectos ambientales en el contexto del emplazamiento de la planta.

Hornos de regeneración

Estos hornos utilizan sistemas regeneradores gemelos de recuperación de calor para precalentar el aire de combustión. Los quemadores suelen colocarse dentro o debajo de los puertos de combustión / gas residual. El horno sólo quema en un lado cada la vez. Los gases calientes de combustión atraviesan el horno y el material refractario de calor en la cámara del regenerador. Después de un tiempo, la cocción se invierte y el aire de combustión de entrada atraviesa la cámara del regenerador caliente, previamente calentado mediante gases residuales. Las temperaturas de precalentamiento se sitúan normalmente entre los 1.100°C y 1.350°C, alcanzando la máxima eficiencia térmica en los hornos calentados con combustibles fósiles.

Existen dos tipos de hornos de regeneración: los de llama transversal y los de llama longitudinal. Los hornos de regeneración de llama transversal disponen de puertos de combustión y quemadores colocados a ambos lados del horno, mientras que las cámaras del regenerador están situadas en uno de los lados del horno. Los hornos de llama longitudinal cuentan con dos cámaras de regenerador a un extremo del horno, cada una de ellas con un único puerto. Los hornos de llama longitudinal se utilizan sobre todo en aplicaciones pequeñas, dado que tienen unas dimensiones y un servicio más compactos, así como unas pérdidas de calor, un consumo de energía y costos de construcción inferiores. Sin embargo, se caracterizan por una llama en forma de U procedente de una cámara de regenerador hasta otra adyacente, lo que resulta problemático para “cubrir” grandes superficies de vidrio (el tamaño máximo de la superficie es de aproximadamente 110–120 m², con una tirada de aproximadamente 400–450 toneladas

/ día). Para las grandes superficies de vidrio, son preferibles los hornos de llama transversal (o de quemadores laterales). La mayor parte de los hornos empleados para la fabricación de vidrio plano disponen de quemadores laterales.

Hornos de recuperación / recuperadores continuos

Los hornos de recuperación utilizan intercambiadores metálicos de calor para recuperar el calor, que precalienta de forma continua el aire de combustión mediante gases residuales. Las propiedades de los materiales limitan las temperaturas de precalentamiento del aire a aproximadamente 750°C-800°C, si bien existen hornos innovadores, todavía en fase de prueba, que permiten precalentar a 900°C o más. Debido a la inferior temperatura de precalentamiento del aire, la capacidad específica de fusión (por unidad de superficie del horno) de estos hornos es aproximadamente un 30 por ciento inferior a la de los hornos de regeneración. Este tipo de horno se utiliza en operaciones que precisan de una mayor flexibilidad y unos gastos de capital inicial limitados. En las operaciones pequeñas, el uso de regeneradores no es económicamente viable. Los hornos de recuperación suelen adoptarse en las instalaciones de menor capacidad, aunque también existen hornos de alta capacidad (de hasta 400 toneladas al día). Los recuperadores continuos (u hornos de calefacción directa) no están necesariamente equipados con recuperadores, si bien hoy en día la mayoría dispone de ellos. Los hornos de recuperación y calefacción directa suelen requerir movimientos de tierra limitados para su instalación.

Hornos de oxigas

La fusión con oxigas implica la sustitución del aire de combustión por oxígeno. La eliminación de nitrógeno procedente de la atmósfera de combustión reduce el volumen de gases residuales y evita el uso de sistemas de recuperación de calor. El uso de energía de los hornos se reduce porque el sistema calienta oxígeno en vez de aire (compuesto en un 80

por ciento de nitrógeno) a temperaturas de combustión. Algunos hornos de oxigas utilizan gases residuales para precalentar el material de mezcla y el polvo de vidrio. La producción específica de NO_x (kg / kg de vidrio) se reduce de forma notable pero, debido a los menores flujos de gases de combustión, las concentraciones de NO_x son mucho mayores de lo normal. El diseño básico de los hornos de oxigas es similar al de los recuperadores continuos, caracterizándose por múltiples quemadores laterales y un puerto de escape de gases de combustión. Su implementación debería tener en cuenta los diferentes costos, descritos en la próxima sección.

Hornos eléctricos

Los hornos eléctricos consisten en una estructura refractaria de fusión con electrodos insertados ya sea a los lados, en la parte superior o, más frecuentemente, en la parte inferior del horno. Los hornos eléctricos suelen ser pequeños y se utilizan sobre todo para la fabricación de vidrio especial. La calefacción eléctrica elimina la formación de subproductos de combustión gracias a la sustitución de combustibles fósiles y pérdidas de mezcla, lo que reduce considerablemente las emisiones del horno. Además, los hornos eléctricos pueden sellarse de forma sustancial, por lo que son los hornos preferidos cuando las emisiones a la atmósfera asociadas con la mezcla son particularmente contaminantes.

Hornos discontinuos

Estos hornos se emplean cuando se necesita producir pequeñas cantidades de vidrio, especialmente en aquellas ocasiones en que la formulación del vidrio cambia con regularidad. Los hornos de crisoles u hornos de colada diaria se utilizan para fundir la mezcla de materias primas. Algunos hornos emplean recuperadores simples, disponen de una geometría cilíndrica concéntrica y alcanzan temperaturas de precalentamiento del aire de 300°C-400°C. No obstante, la

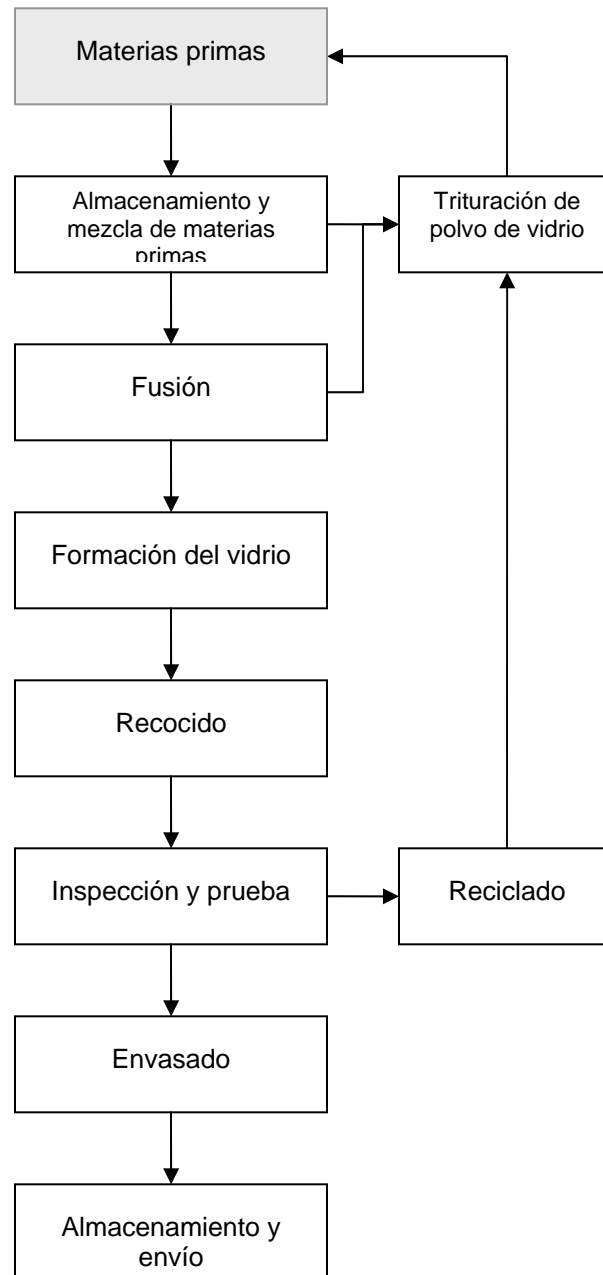
mayoría de estos hornos no cuentan con sistemas de precalentamiento del aire.

Refuerzo eléctrico y de oxígeno

Aunque existen hornos totalmente eléctricos, a menudo se utiliza el “refuerzo” eléctrico para complementar el calentamiento generado por la combustión de combustible en los hornos de regeneración o recuperación. El refuerzo eléctrico crea las condiciones necesarias para calentar ciertas zonas del vidrio para las cuales el calentamiento con llama normal (llama inferior) resulta difícil o cuando se desea un perfil específico de temperatura. La energía eléctrica también puede emplearse cuando se precisa un incremento a corto plazo de la producción o un aumento del producto del horno sin llevar a cabo grandes transformaciones. El volumen de electricidad generado normalmente mediante el refuerzo eléctrico se sitúa entre el 4 y el 10 por ciento del total de la energía empleada. De igual manera, la sobreoxigenación (sustituir el aire de combustión por oxígeno en un número limitado de quemadores) se emplea para incrementar la producción del horno en ciertas circunstancias. Por lo general, entre un 10 y un 30 por ciento del aire de combustión se sustituye por oxígeno.

Los hornos de oxigas y eléctricos muestran reducciones constantes en el uso de combustible del horno, y dado que no son necesarios los sistemas de recuperación de calor residual dado el volumen sustancialmente inferior de gases residuales, también disminuyen los costos de inversión. No obstante, un correcto equilibrio de los aspectos económicos, energéticos y ambientales de estas tecnologías debería tener en cuenta los aspectos energéticos y ambientales relacionados con la producción de oxígeno y electricidad. El costo relativo de la electricidad y los combustibles fósiles constituye el principal problema relacionado con la viabilidad económica de estas técnicas y debe de estudiarse caso por caso.

Gráfico A.1: Proceso de fabricación de vidrio



Nota: El polvo de vidrio externo, no representado en este gráfico, también se utiliza como materia prima. Dado que se lava antes de usar, no puede tratarse con las demás materias primas. El polvo de vidrio suele almacenarse en su estado original – lavándose y añadiéndose posteriormente al lote – sin almacenar el polvo de vidrio limpio