

**Informe de valoración técnica,
económica y ambiental de la
aplicabilidad de medidas
secundarias de reducción de NOx**
ANFEVI, Asociación Nacional de Fabricantes de
Envases de Vidrio

09/10/2014
CIMAS
Versión v6

Introducción**Resumen ejecutivo**

- I. El sector de fabricación de envases de vidrio en España**
- II. Análisis del entorno y calidad del aire**
- III. Proceso de fabricación de vidrio para envases**
- IV. Emisiones asociadas a la etapa de fusión**
- V. Técnicas de reducción de NOx**
 - A. Modificaciones en la combustión**
 - B. Diseños especiales de hornos**
 - C. Fusión con oxidación**
 - D. Reducción química por combustible**
 - E. Reducción Catalítica Selectiva (SCR)**
 - F. Reducción No Catalítica Selectiva (SNCR)**
- VI. Factores que influyen en los niveles de emisión de NOx**
- VII. Mejores Técnicas Disponibles para la fabricación de envases de vidrio, respecto a las emisiones de óxidos de nitrógeno**
- VIII. Implantación de Mejores Técnicas Disponibles a nivel nacional**
- IX. Análisis de escenarios**
 - **Escenario 0 (Línea Base)**
 - **Escenario 1**
 - **Escenario 2**
- X. Aspectos relevantes de impacto ambiental**
- XI. Costes económicos**
- XII. Análisis coste-beneficio**

Introducción

El presente documento tiene por objeto analizar en términos de coste-eficacia la posible aplicación de medidas de reducción de las emisiones de óxidos de nitrógeno (NOx) en el proceso de fusión de vidrio para envases.

Es necesario profundizar en el análisis de la situación actual del sector, de sus controles y de los valores de sus emisiones, así como en el estudio detallado de la relación coste-eficacia de las medidas primarias disponibles y de las medidas secundarias expuestas en el documento de Conclusiones BAT.

Es necesario mencionar que una planta existente debe considerar las BART (Best Available Retrofit Techniques) ya que no se trata de autorizar una nueva inversión productiva sino de fomentar la modernización medioambiental de las instalaciones a través de la actualización de sus permisos individuales, con un carácter marcadamente sectorial.

La EPA americana ha decidido que este límite de emisión se debe imponer tras un análisis caso por caso, tomando en consideración la tecnología disponible, los costes de cumplimiento, la energía y otros impactos ambientales derivados de ese cumplimiento, las medidas de depuración ya instaladas, la vida útil de la instalación productiva y el grado de mejora que se puede anticipar por el uso de esa tecnología.

El modelo de determinación de BAT que ha adoptado la UE sigue un enfoque de “planta de referencia”, aquella en donde se encuentran operativas las técnicas de reducción de la contaminación que ofrecen los mejores resultados. La Directiva de Emisiones Industriales (DEI) pretende insistir en el empuje a que las instalaciones industriales se asemejen a esas plantas de referencia en el corto-medio plazo. Para una instalación de nueva construcción esa semejanza no presenta grandes inconvenientes, pero no sucede lo mismo con las instalaciones existentes.

El Documento de Referencia sobre las BAT (Best Available Techniques) para la fabricación de vidrio, adoptado en 2012, señala que las conclusiones sobre las BAT se han establecido tras un proceso iterativo con estas etapas:

- Identificación de los aspectos ambientales clave del sector.
- Examen de las técnicas más adecuadas para abordar estos aspectos clave.
- Identificación de los mejores resultados medioambientales alcanzables en base a los datos disponibles tanto en la UE como en el resto del mundo.
- Examen de las condiciones bajo las cuales se han conseguido estos niveles, incluyendo los costes y los efectos cruzados sobre otros apartados medioambientales, así como las principales fuerzas motivadoras de su implementación.
- Selección de las BAT.

El Documento de Referencia relativo a las cuestiones económicas y a los efectos cruzados entre compartimentos ambientales fija las reglas del juego para el proceso de intercambio de información y para la revisión de los documentos BREF sectoriales. La adopción de las conclusiones BAT en cada sector tiene ya en cuenta las consideraciones de este documento transversal durante el proceso de discusión previo. No obstante, en su capítulo 5 este Documento de Referencia deja abierta la puerta a un análisis posterior más detallado en relación con la estructura del mercado al que atienden las instalaciones de un sector, su extensión geográfica y la competencia con productos sustitutivos, como puede ser el caso de los envases.

En este Documento se hace también referencia explícita a que “puede haber una oportunidad para reducir el impacto financiero de la imposición de nuevos VLE, definiendo unos plazos ampliados para la incorporación de las técnicas de más coste, en relación con la vida útil de las instalaciones y sus modificaciones integrales”. No se trataría solo de aprovechar la parada de reconstrucción de un horno para incorporar mejoras ambientales, sino que cabe la posibilidad de establecer un horizonte temporal a más largo plazo en el que se prevea una modernización integral del conjunto de la instalación. En ese momento se puede dar cabida a la incorporación de una técnica más costosa de reducción de emisiones, siempre que esa espera haya podido quedar justificada previamente.

Nuestro punto de partida será el documento de Conclusiones BAT adoptado por la Comisión Europea en 2012. En él se recogen los datos finales del intercambio de información que soporta el proceso de revisión de los BREF y debe ser tenido en cuenta por las administraciones ambientales durante su tarea de revisión de las Autorizaciones Ambientales Integradas (AAI), así como para el establecimiento de nuevos valores límite de emisión.

Resumen ejecutivo

El sector de fabricación de envases de vidrio utiliza hornos de fusión en continuo (trabajan 365 días al año y 24 horas al día) con periodos de vida media de entre 10 y 12 años, a partir de los que se debe proceder a su reparación total o sustitución por uno nuevo. Estos hornos suponen una **gran inversión en 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 **coincidiendo con las reconstrucciones del horno**, así como la implantación de medidas secundarias de eliminación. No obstante, durante las campañas de operación de horno es posible realizar algunas mejoras en el funcionamiento del horno.

Adicionalmente, el sector de fabricación de envases de vidrio es **intensivo en consumo de energía**, suponiendo este aspecto entre un 20% y 30% de los costes de producción. De esta circunstancia se deriva que su reducción es un objetivo prioritario (que debe estar equilibrado con el impacto ambiental y en concreto con las emisiones de NOx y CO) y que cualquier incremento en el coste del combustible (gas natural, de forma generalizada) en el sector de fabricación de envases de vidrio tiene un fuerte reflejo en la rentabilidad.

La **elección entre gas natural y fuel oil** depende en amplia medida de las condiciones económicas actuales y de las **políticas energéticas de los Estados Miembros**. En general, viene condicionado por la jerarquía de prioridades que impone cada Estado en función de sus políticas energéticas, que obedecen a intereses macroeconómicos, a compromisos y relaciones internacionales o a estrategias a largo plazo. En todo caso, el cambio de gas natural por fuel oil como combustible en hornos de fusión de vidrio, no debe considerarse como escenario viable para la reducción de las emisiones a la atmósfera de óxidos de nitrógeno (NOx), ya que la utilización de gas natural como combustible viene impuesta por la Política Energética del país (en este caso, España).

La Política Energética Española se caracteriza por una menor proporción de energía eléctrica frente a los combustibles fósiles y dentro de estos con mayor empleo de gas natural que de fuel oil.

Por tanto, el empleo de gas natural como combustible produce menores emisiones de SOx y CO₂, aunque origina mayores emisiones de NOx. Este fenómeno se produce debido a que la llama de gas natural es menos radiante y generalmente da lugar a mayor consumo de energía.

El **uso de casco** (o calcín) en un horno de vidrio es fundamental para las empresas fabricantes de envases ya que su empleo en sustitución de materias primas vírgenes, **reduce significativamente el consumo energético**.

El casco de vidrio consume menos energía de fusión que las materias primas vírgenes que lo componen, dado que las reacciones endotérmicas asociadas a 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 potencial de ahorrar energía, y por regla general cada 10% adicional de casco produce una reducción del 2,5 - 3,0% en el consumo de energía del horno.

España es un **país netamente exportador de envases de vidrio**, tanto vacíos como llenos, por lo que la **disponibilidad de casco es menor** que en otros países europeos.

Un dato relativo a los niveles de **emisión de NOx** únicamente tiene validez cuando va acompañado tanto de las **circunstancias** que lo afectan (**tecnología de fusión, tipo de energía, edad del horno, empleo de casco (%)**), **apoyo eléctrico (boosting)**, como del **modo de obtención** (norma empleada, niveles de detección de los aparatos, grado de incertidumbre, y si la toma de muestra ha sido realizada en continuo o puntualmente y en este caso de qué forma).

ANFEVI ha trabajado en esta línea y **ha elaborado un documento** ("*Guía de aspectos a considerar en el marco de la monitorización de emisiones a la atmósfera*", ANFEVI 2014) que establece las pautas a seguir para la monitorización de las emisiones (tanto en continuo como puntual), considerando las peculiaridades del sector de fabricación de envases de vidrio.

Adicionalmente y para asegurar el **cumplimiento de los Valores Límites de Emisión** asociados a las MTDs para emisiones atmosféricas, es necesario tener en cuenta las conclusiones recogidas en el mencionado documento respecto a la definición de las **condiciones normales de funcionamiento**.

Conclusiones

Implantación de medidas primarias

Los **niveles de emisiones** alcanzables con estas técnicas **varían** considerablemente según **varios factores: el punto de partida, la edad del horno, la tecnología de fusión, el combustible utilizado, el tipo de vidrio fabricado y en consecuencia el empleo de casco**, y particularmente según el rigor con el que se apliquen y controlen dichas medidas. Es necesario buscar un cierto equilibrio entre todos ellos para intentar optimizar el proceso desde el punto de vista energético, así evitar la generación de efectos cruzados; por ejemplo asociados a la aplicación de tecnologías de tratamiento fin de línea (SCR, SNCR,...).

Los efectos de las diferentes modificaciones de la combustión no son acumulativos, ya que generalmente se trata de diferentes formas de alcanzar los mismos objetivos generales. Las reducciones globales de las emisiones para sistemas de combustión optimizados varían ampliamente; para un horno en el que no se hayan utilizado con anterioridad estas técnicas, cabe esperar reducciones de las emisiones de NOx del 40 – 60% en la mayoría de las aplicaciones.

Siempre es preferible el empleo de medidas primarias frente a medidas secundarias, ya que las primeras **centran su esfuerzo en prevenir la contaminación** (evitar la generación de emisiones de NOx) mientras que las **secundarias tratan las emisiones un vez producidas**; siendo para ello necesario consumos adicionales de reactivos (amoníaco y catalizador, en el caso de la tecnología SCR) además de energía eléctrica, y pueden producirse efectos adicionales como emisiones de NH₃, CO₂, SO_x,....

Siempre que sea factible la introducción de medidas primarias y secundarias en el mismo horno, debería realizarse un estudio técnico-económico (considerando también los “efectos cruzados”) para determinar si está justificado ambiental y económicamente la adopción de dichas medidas.

En particular, si con la adopción de medidas primarias se han conseguido o se prevé conseguir un cierto nivel de emisiones, la decisión de si un gasto adicional en medidas secundarias está justificado, debería tener en cuenta primero los niveles que se pueden conseguir con estas técnicas primarias.

Técnica SCR (Reducción Catalítica Selectiva)

Del análisis de los niveles de emisión de NOx en el sector vidriero, tal y como se muestra en el apartado V (punto E) del presente documento, si parece necesario en algunos sectores, como vidrio plano o vidrio especial, la adopción de medidas secundarias (tipo tecnología SCR) para alcanzar niveles de emisión próximos a 700 – 950 mg/Nm³, similares a los que se obtienen en el sector de vidrio hueco con la adopción exclusivamente de medidas primarias.

Adicionalmente, la **Reducción Catalítica Selectiva (SCR) no es una técnica probada con garantías en el sector de envases (vidrio hueco)**. En otros sectores como vidrio plano, ha sido probada ampliamente. Las referencias de plantas europeas que cuentan con sistemas SCR son para vidrio plano (no para vidrio hueco). De hecho, la única planta de referencia cuyos valores de emisión se recogen en el documento Bref 2013 tiene su sistema de tratamiento SCR fuera de funcionamiento, según información facilitada por las empresas del sector.

Los **principales efectos cruzados asociados** a la aplicación de la **técnica SCR** es la **emisión de amoníaco, el uso de energía eléctrica y la producción de residuos del catalizador gastado**. El uso de amoníaco está asociado no solamente con la emisión de la solución que no ha reaccionado sino también con los requisitos legales en materia de seguridad y medio ambiente para el transporte, almacenamiento y uso del mismo (*Directiva SEVESO*). También hay que considerar las emisiones asociadas a la producción de amoníaco. Las emisiones de amoníaco son un elemento de preocupación y pueden ser un factor limitante de la eficacia de la técnica.

Otras técnicas de tratamiento/reducción de emisiones de NOx

Algunas **otras técnicas**, tanto primarias (**combustión por fases, recirculación de gases de salida,...**) como secundarias (**3R, SNCR,...**) **no están implantadas de forma efectiva** en el sector de fabricación de envases de vidrio, no existiendo por tanto referencias de su efectividad.

De hecho, existentes algunas iniciativas financiadas por el programa LIFE relacionadas con la implantación a escala industrial de algunas de las MTDs recogidas en el documento de BATC, como por ejemplo: recirculación de gases.

Niveles de emisión de NOx previstos

Los **niveles de emisión** asociados a las MTDs (800 mg/Nm³) son **alcanzables** por las empresas del sector en España para el año 2016, **con las implantación de medidas primarias avanzadas**, teniendo en cuenta los criterios establecidos en la “*Guía de aspectos a considerar en el marco de la monitorización de emisiones a la atmósfera*”, ANFEVI 2014.

Costes de implantación y costes operativos

Independientemente de las limitaciones de su aplicabilidad, para la industria vidriera un factor importante a considerar es el coste de la técnica SCR comparado con otras técnicas. La **Reducción Catalítica** es una técnica relativamente cara si se compara con las medidas primarias. Por tanto, **no se considera** de forma general por la industria vidriera, esta técnica **como la más efectiva desde el punto de vista técnico-económico, para la reducción de las emisiones de NOx.**

La técnica tiene un elevado coste de inversión y unos costes operativos muy superiores a los asociados a las medidas primarias (tanto básicas como avanzadas).

Según los datos aportados por las empresas de ANFEVI:

<i>Horno de 350 t/d</i>	Inversión requerida (€)	Costes de operación anuales (€)
Escenario 1: Medidas primarias básicas	142.000	30.000
Escenario 2: Medidas primarias avanzadas	1.319.200	30.000
Escenario 3: SCR	1.150.000	156.000

Fuente: ANFEVI, 2014.

Se ha seleccionado un nivel de producción de 350 t/d porque es el nivel que puede considerarse más habitual de los hornos de fusión utilizados por las empresas de ANFEVI.

Aunque la inversión requerida en la **implantación de medidas primarias avanzadas** es similar a la del SCR (en torno a 1 M€), hay que destacar que en el primer caso, además se producen efectos **beneficiosos** en otros aspectos, como:

- **no se genera ningún otro aspecto medioambiental significativo** (efectos cruzados),
- produce a menudo **ahorros significativos de energía**,
- se producen **menores emisiones globales** como consecuencia de temperaturas del horno menores y **menor consumo de energía**.

Adicionalmente, los costes anuales de operación son considerablemente superiores; los costes alcanzan los 156.000 € con SCR frente a 30.000 € con medidas primarias (tanto básicas como avanzadas).

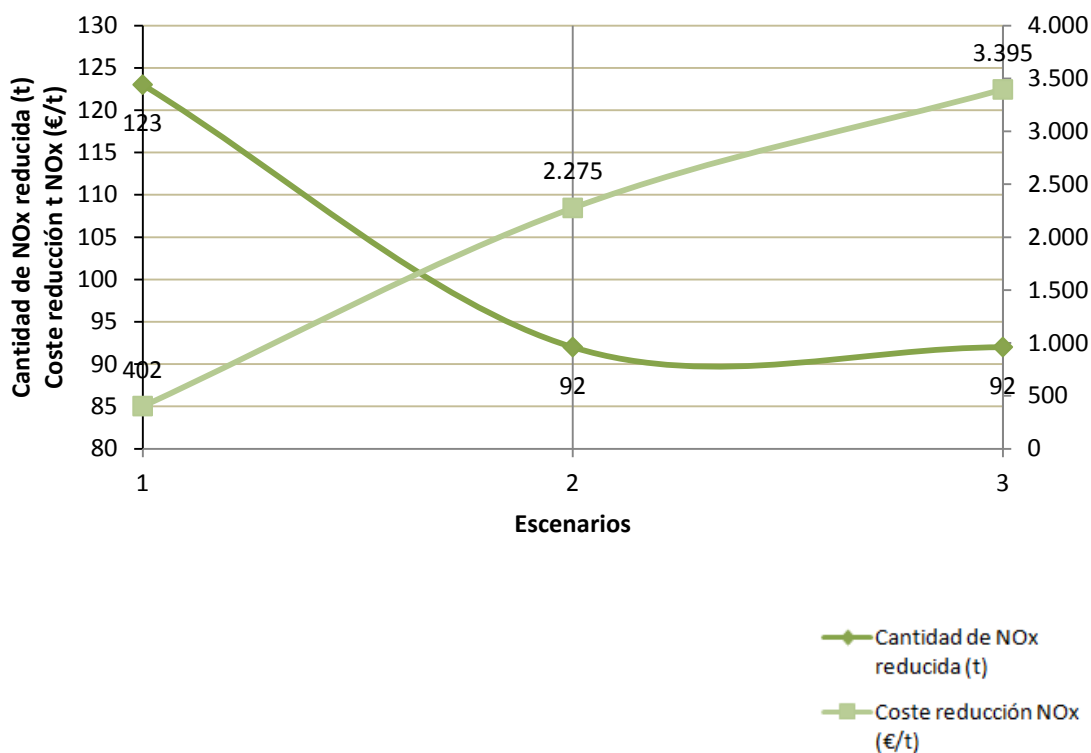
Una **parte considerable del coste de operación de la técnica SCR está asociado al consumo y almacenamiento de NH₃.**

Si consideramos el coste por tonelada de NOx para la tecnología SCR se obtienen los mejores resultados para hornos grandes (de 450 t/d), con un valor de 1.524 €/t, y se consiguen reducciones considerables (228 toneladas de NOx).

Según los datos disponibles para un horno de 350 t/d:

	Toneladas de NOx reducidas al año	Costes (€)/tonelada NOx reducida
Escenario 1: Medidas primarias básicas	123	402
Escenario 2: Medidas primarias avanzadas	92	2.275
Escenario 3: SCR	92	3.395

Fuente: ANFEVI, 2014.



La realidad actual de las empresas de ANFEVI es que cuenta con hornos de capacidad inferior, más próximos a 350 t/d, por lo que la **relación coste-eficiencia no es la óptima (menores reducciones y mayores costes por tonelada de NOx reducida)**.

Si consideramos, el coste por tonelada de vidrio fundido (tvf), el coste de la implantación de la técnica SCR supone un incremento del 49% en el coste, con respecto a la adopción de medidas primarias avanzadas.

	Medidas primarias avanzadas	SCR
Horno de 350 t/d	1,64 €/tvf	2,44 €/tvf

Fuente: ANFEVI 2014

I. El sector de fabricación de envases de vidrio en España

Las sociedades que integran **ANFEVI (Asociación Nacional de Fabricantes de Envases de Vidrio, www.anfevi.com)** representan más del 98% de la producción en España de envases de vidrio, fabricando diariamente cerca de 19 millones de botellas y tarros. Los miembros de la Asociación cuentan con 13 fábricas ubicadas por toda la geografía nacional y generan empleo directo a cerca de 4.000 personas. Estas plantas pertenecen a 5 grupos empresariales: VERALLIA (Azuqueca de Henares – Guadalajara, Burgos, Dos Hermanas – Sevilla, Zaragoza y Montblanc – Tarragona), VIDRALA (Llodio – Álava, Caudete – Albacete y Castellar del Vallés – Barcelona), OI EUROPE (Alcalá de Guadaíra – Sevilla y Barcelona), BA VIDRO (Villafranca de los Barros – Badajoz y León) y VICSA – Vidrieras Canarias (Teide – Gran Canaria).

Éstas empresas forman parte de FEVE (Federación Europea de Envases de Vidrio), una federación que representa a la industria de envases de vidrio a nivel internacional, y especialmente a nivel europeo, sirve como un foro para examinar las cuestiones comunes.



Las principales características de esta industria en España son:

- **Productivas:** la producción es de tipo continuo (365 días/año y 24 horas/día), por exigencias del proceso de fusión y homogeneización del vidrio para un tratamiento automático del proceso de moldeo, precisando de una gran regularidad de funcionamiento.
- **Financieras:** la industria de envases de vidrio es intensiva en capital. El gran volumen de inversión requerido para arrancar la actividad hace necesaria una especial consideración hacia la inversión y la programación de las campañas.
- **Temporales:** la vida media de un horno de fusión de vidrio es de 10 a 12 años, a partir de los que se debe proceder a su reparación total o sustitución por uno nuevo. Es exclusivamente al finalizar este periodo cuando se pueden incorporar al proceso las modificaciones necesarias para adecuarse a las cambiantes condiciones del mercado y las exigencias legislativas.

- **Energéticas:** la fabricación de envases de vidrio consume una elevada cantidad de energía, que puede variar entre el 20% y 30% de los costes de producción. De esta circunstancia se derivan dos consecuencias: que su reducción es un objetivo prioritario y que cualquier incremento del coste de combustible tiene un fuerte reflejo en la rentabilidad.
- **Tecnológicas:** las empresas vidrieras de ANFEVI se encuentran al mismo nivel que las del resto de países en materia tecnológica, de hecho los grupos empresariales son propietarias de plantas en otros países europeos.

El sector de vidrio hueco español tiene una estructura similar a la de otros países fabricantes: fuerte concentración de capital en pocos grupos empresariales de un **nivel tecnológico equiparable al resto de países del entorno**. La situación en 2014 es la siguiente:

Sector de Fabricación de Vidrio Hueco	
Número de empresas	5
Número de centros de producción	13
Número de hornos	25
Empleo año 2013 (personas)	3.241

En cuanto a datos de ventas y exportación (ANFEVI):

	2009	2010	2011	2012	2013
VENTAS INTERIORES (toneladas)	1.718.443	1.754.415	1.760.985	1.692.124	1.663.315
EXPORTACIÓN (toneladas)	312.067	394.531	441.702	464.396	423.349
TOTAL MERCADO (toneladas)	2.030.510	2.148.946	2.202.687	2.156.520	2.086.664

A destacar:

Los dos aspectos que mejor pueden definir la trayectoria de la industria vidriera española son la **competitividad y el crecimiento**. España es el cuarto productor europeo, por detrás de Alemania, Francia e Italia. **El grado de innovación tecnológica, junto con la capacidad inversora, productiva y de comercialización, son la clave para la competitividad, permitiendo situar la producción española en los puestos más destacados del mercado vidriero europeo.**

II. Análisis del entorno y calidad del aire

España comunica anualmente información sobre calidad del aire a la Comisión Europea en cumplimiento de la *Directiva 2008/50/CE relativa a la calidad del aire ambiente y a una atmósfera más limpia en Europa*, y de la *Directiva 2004/107/CE (4ª Directiva Hija)*, *relativa al arsénico, el cadmio, el mercurio, el níquel y los hidrocarburos aromáticos policíclicos en el aire ambiente*.

El último informe elaborado (*Informe de la Evaluación de la Calidad del Aire en España 2012, MAGRAMA*) presenta los resultados de la evaluación de la calidad del aire en 2012 que han sido notificados a la Comisión Europea, detallando la situación de las zonas con respecto a los valores legislados.

La evaluación de 2012 se realizó para los siguientes contaminantes:

Dióxido de azufre (SO₂), dióxido de nitrógeno (NO₂), óxidos de nitrógeno (NO_x), partículas (PM₁₀ y PM_{2,5}), plomo (Pb), benceno (C₆H₆), monóxido de carbono (CO), ozono (O₃), arsénico (As), cadmio (Cd), níquel (Ni) y benzo(a)pireno (B(a)P).

La evaluación de la calidad del aire del año 2012 en España, realizada a partir de los datos generados por las redes autonómicas, locales y nacionales de calidad del aire, pone de relieve que en lo que respecta al NO₂, que se siguen produciendo superaciones en algunas de las principales aglomeraciones metropolitanas, pero el número de éstas tiende a disminuir.

En el año 2012 se han producido siete superaciones del VLA (Valor Límite Anual) de NO₂ para la protección de la salud humana y dos del VLH (Valor Límite Horario). No obstante tres de las siete zonas con superación del VLA disponen de una prórroga para el cumplimiento del mismo.

Las dos zonas que superaron el VLH fueron las siguientes:

- Madrid (ES1301)
- Urbana Sur (ES1309)

Las zonas que superaron el VLA son:

- Área de Barcelona (ES0901)
- Vallés-Baix Llobregat (ES0902)
- Madrid (ES1301)
- Ciudad de Murcia (ES1407)

Zonas de superación del Valor Límite Anual (VLA) 2012



Fuente: Informe de la Evaluación de la Calidad del Aire en España 2012 (MAGRAMA)

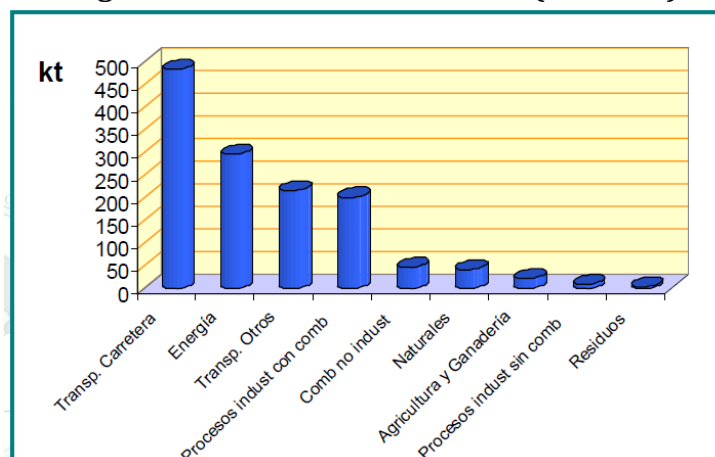
Por último, en lo referente al nivel crítico de NOx para la protección de la vegetación, en 2012 no se registraron superaciones en ninguna de las zonas evaluadas.

El análisis de los datos evidencia mejora en la situación de la calidad del aire en lo que se refiere al dióxido de nitrógeno. En las principales aglomeraciones metropolitanas se producen superaciones de ambos valores límite, aunque se observa una tendencia a la baja. Las superaciones del valor límite horario se reducen a dos zonas; y, en cuanto al valor límite anual, se registraron superaciones en cuatro zonas; en otras tres, para las que existe una prórroga de cumplimiento, se superó el VLA pero no el VLA+margen de tolerancia. Sumando ambas situaciones, el resultado es inferior al número de superaciones del año 2011.

Las principales fuentes de emisión de NOx, según se recoge en el *Plan Nacional de Calidad del Aire y Protección de la Atmósfera 2013 – 2016 (Plan AIRE)*, son las **relacionadas con la combustión, destacando claramente el transporte**. Las emisiones de NOx en industria son importantes pero dada su ubicación (normalmente lejos de núcleos urbanos) y sus condiciones de emisión (chimeneas de altura considerable), no suelen generar superaciones de niveles de NO₂.

No existe información sobre fuentes de emisión de NO₂, pero si de NOx, que es la suma de NO + NO₂. Las principales fuentes de emisión de NOx son las relacionadas con la combustión, destacando claramente el transporte.

Origen de la contaminación de NOx (NO + NO₂)



Fuente: Plan Nacional de Calidad del Aire y Protección de la Atmósfera 2013 – 2016 (Plan AIRE)

Según datos 2011, se confirma que la principal causa de **superación** es el **tráfico intenso (63%)** y en segundo lugar la **proximidad a una carretera (29%)**, lo que supone que un total de **92% de las superaciones se adjudican al tráfico**. Otras causas que son importantes, pero en menor medida que las anteriores son: industria local, minería, calefacción residencial y aparcamiento público.

No obstante, habrá que considerar la localización de cada una de las plantas vidrieras, por si pudieran encontrarse en zonas de especial interés (zonas protegidas por su valor en biodiversidad), que requieran medidas adicionales para la reducción de las emisiones de NOx.

Adicionalmente, si se consideran los datos obtenidos del reporte de los Estados Miembros en el marco de la *Directiva Techos de Emisión – Directive 2001/81/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2001 on national emission ceilings for certain atmospheric pollutants*, se puede concluir, en cuanto a las emisiones de NOx, que:

- Los mayores emisores de NOx en 2012 fueron Alemania, Reino Unido y Francia.
- Para el periodo 2011 y 2012, 21 de los 28 Estados Miembros declararon reducciones en las emisiones. La reducción total para UE-28 fue del 2,6%.
- **Las mayores reducciones en valor absoluto** tuvieron lugar en Grecia, Polonia y **España**.
- **Los datos provisionales para 2012** indica que nueve Estados Miembros (Austria, Bélgica, Francia, Alemania, Irlanda, Luxemburgo, Malta, Eslovenia y **España**) **no alcanzaron sus techos de emisión en 2012**.

A destacar:

Las principales fuentes de emisión de NOx, según se recoge en el *Plan Nacional de Calidad del Aire y Protección de la Atmósfera 2013 – 2016 (Plan AIRE)*, son las relacionadas con la **combustión, destacando claramente el transporte. La principal causa de superación de NOx** es el tráfico intenso y en segundo lugar la proximidad a una carretera, lo que supone que un total de 92% de las superaciones **se adjudican al tráfico.**

Según los últimos datos disponibles, **España** es uno de los Estados Miembros que **no ha alcanzado su techo de emisión en cuanto a las emisiones de NOx en 2012** (Fuente: *NEC Directive status report 2013, EEA – European Environment Agency*).

III. Proceso de fabricación de vidrio para envases

El proceso de fabricación de vidrio hueco (envases de vidrio) comienza con la descarga en los silos de recepción de las materias primas (arenas, carbonatos, casco o calcín, principalmente), desde las cuales son trasladadas a los silos de almacenamiento. A continuación se realiza el pesaje automático de las cantidades exactas de materias primas mediante básculas electrónicas, lográndose la mezcla adecuada que alimentará al horno de fusión y que se denomina mezcla vitrificable.

Esta mezcla es sometida a un proceso de fusión en continuo en hornos, a una temperatura superior a 1.500 °C. La **fusión** (la mezcla de materias primas a alta temperatura para obtener vidrio fundido) es la parte más importante del proceso productivo, ya que representa el **90% del consumo energético total**; y en lo que a **emisiones de NOx** se refiere, en esta etapa del proceso se genera la **totalidad de este tipo de emisiones**.

Se trata de una compleja combinación de reacciones químicas y procesos físicos, y pueden dividirse en varias fases:

- calentamiento,
- fusión primaria,
- afino y homogenización, y
- acondicionamiento.

Calentamiento

La forma convencional de suministrar calor al vidrio fundido es mediante combustibles fósiles sobre un baño de material de mezcla, que se alimenta de forma continua y luego se extrae del horno en estado fundido. La temperatura necesaria para fundir y afinar el vidrio depende de la formulación prevista, pero el intervalo se sitúa entre 1.300 °C y 1.500°C. 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.

Fusión primaria

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. La primera reacción, de descarbonatación tiene lugar a unos 500°C. Las materias primas comienzan a fundirse entre 750 °C y 1.200 °C; primero, la arena comienza a disolverse por la acción de los agentes fundentes, luego 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, formándose agua, dióxido de carbono, óxidos de nitrógeno y óxidos de azufre. De esta forma, el vidrio fundido se hace finalmente transparente y se completa la fase de fusión.

Afino y homogeneización

El vidrio fundido debe ser homogeneizado y libre de burbujas antes de ser transformado en productos. 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 Na_2CO_3 y caliza CaCO_3) y en menor medida por el aire presente en las materias primas. Estas burbujas deben ser eliminadas del vidrio fundido, ya que pueden causar defectos en el producto acabado, lo que afecta negativamente a su resistencia mecánica y a su aspecto.

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 de forma efectiva las burbujas generadas en 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.

El agente de afino más frecuentemente utilizado en la producción de vidrio para envases es el sulfato sódico (Na_2SO_4). A una temperatura de unos 1.450 °C el sulfato sódico se descompone formando óxido sódico Na_2O (que se incorpora al vidrio), óxidos gaseosos de azufre y oxígeno. El sulfato sódico actúa además de agente de afino como agente oxidante, para ajustar el estado redox de los elementos colorantes del vidrio.

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 enfría a una temperatura operativa entre 900°C y 1.350°C.

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.

Técnicas de fusión

La elección de la técnica de fusión dependerá de varios factores, pero en particular de: capacidad requerida, formulación del vidrio, precio de los combustibles, infraestructura existente, y comportamiento medioambiental.

En función de la capacidad de la planta, se puede considerar:

- ✓ para instalaciones de gran capacidad (> 500 toneladas/día) se emplean casi siempre hornos regenerativos de llama transversal.
- ✓ para instalaciones de media capacidad (100 – 500 toneladas/día) se suelen utilizar hornos regenerativos de llama de bucle, aunque también pueden usarse recuperativos, y en ocasiones de oxicomcombustión.
- ✓ Para instalaciones de pequeña capacidad (25 – 100 toneladas/día) por lo general se emplean recuperativos, regenerativos de llama de bucle, y de oxicomcombustión.

Los hornos de vidrio están generalmente diseñados para fundir grandes cantidades de vidrio a lo largo de un periodo continuo de tiempo, de entre 10-12 años, y un rango de producción de entre 20 y 600 toneladas de vidrio diarias. El vidrio se halla contenido en una cuba construida de material refractario, y generalmente tiene forma rectangular, cerrada por un techo de bóveda. El diseño del horno puede ser muy variado, dependiendo del 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 muy intensiva en el uso de energía, por lo que la técnica de calentamiento y el método de recuperación de calor son decisivos en el diseño del horno, además del comportamiento medioambiental y la eficacia energética de la etapa de fusión. Las tres fuentes de energía más habituales son: gas natural, fuel oil y electricidad.

El uso del gas natural presenta ventajas, por su elevada pureza, facilita el control y no se requieren instalaciones de almacenamiento como en el caso del fuel. El gas también es preferido con objeto de reducir las emisiones de dióxido de azufre asociadas a la combustión de fuel. Por otro lado, el uso de gas natural eleva las emisiones de NOx.

Muchos hornos grandes están equipados para funcionar tanto con combustible 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. Un motivo para alternar gas y fuel, es el precio variable de los combustibles.

La tercera fuente de energía es la electricidad, que puede usarse como fuente de energía en exclusiva o en combinación con combustibles fósiles. La electricidad puede usarse para suministrar energía en tres forma básicas: calentamiento resistivo, en el que se pasa una corriente a través del vidrio fundido; calentamiento inductivo, en el que se índice 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 vidriera.

Las principales técnicas de fusión aplicables al sector de vidrio para envases son:

Los **hornos regenerativos** utilizan sistemas regenerativos de recuperación del calor. Los quemadores suelen colocarse en las lumbreras de gases de escape o aire de combustión o debajo de ellas. El calor de los gases de escape se utiliza para precalentar el aire antes de la combustión, haciendo pasar los gases por una cámara de material refractario, que absorbe el calor. El horno, en cualquier momento dado, sólo combustiona en dos grupos de quemadores. Al cabo de un periodo predeterminado, generalmente veinte minutos, el ciclo de combustión del horno se invierte (denominado “inversiones”) y el aire de combustión pasa a través de la cámara previamente calentada por los gases residuales. Un horno de este tipo 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 temperatura de precalentamiento puede alcanzar hasta 1.400 °C, lo cual permite conseguir una eficiencia energética elevada.

Estos hornos son generalmente más eficientes debido al sistema de precalentamiento del aire de combustión. El menor uso de energía por tonelada de vidrio fundido consigue reducir las emisiones de varios de los contaminantes de combustión. No obstante, las elevadas temperaturas de precalentamiento favorecen la formación de NOx. Estos hornos muestran buenos resultados con técnicas primarias de control de emisiones, particularmente para NOx. De los dos tipos de hornos regenerativos; los de tipo “*end-fired*” (llama bucle) presentan mejor eficiencia energética y emisiones menores.

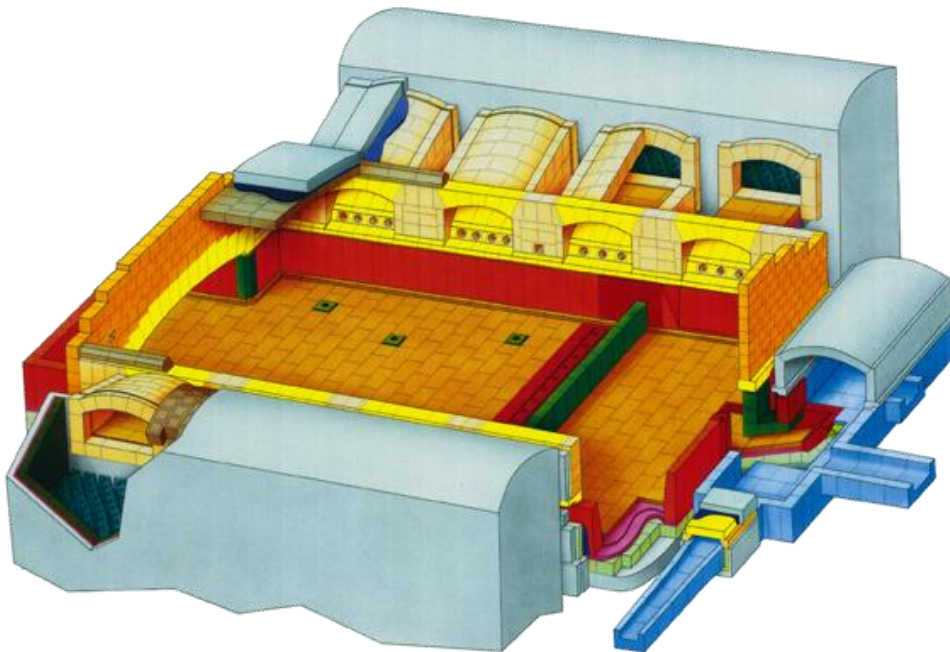
El cambio a tipo llama transversal solamente es posible en una reconstrucción total del horno. Asumiendo que es posible la construcción si se dispone de espacio suficiente, los costes adicionales asociados pueden compensar los beneficios económicos y ambientales.

El mayor coste de los hornos regenerativos hace que sean viables económicamente solo en el caso de producción altas (generalmente superiores a 100 toneladas/día). Para producciones superiores a 500 toneladas/día, se opta por hornos tipo transversal para conseguir un mejor control energético a lo largo de toda la longitud del horno.

La mayoría de las plantas de envases de vidrio tienen hornos regenerativos de llama de bucle o de llama transversal.

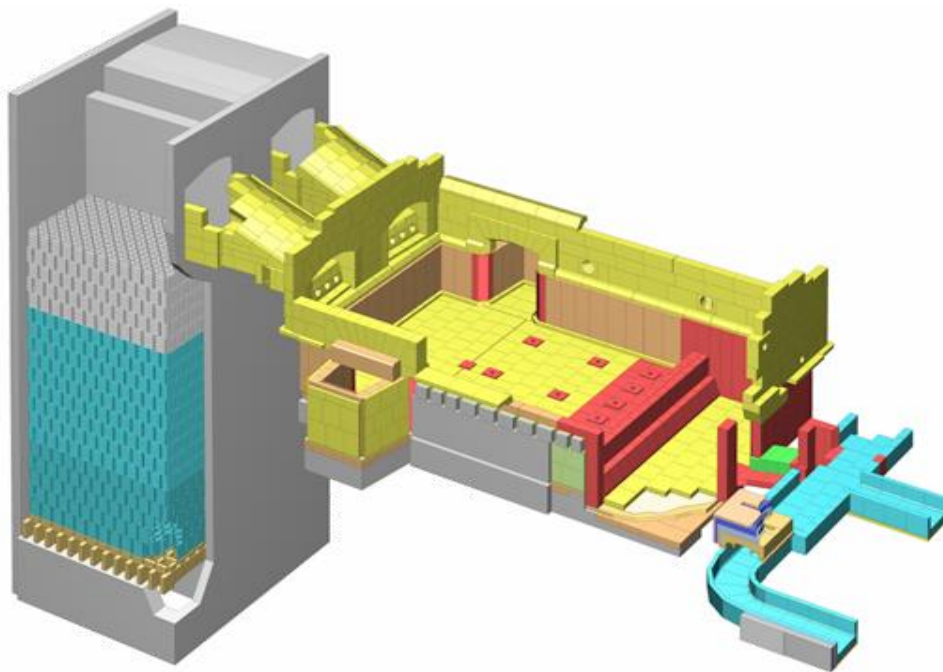
En **hornos regenerativos de llama transversal**, los pórticos de combustión y los inyectores están situados a ambos lados del horno, las cámaras regenerativas están situadas también a ambos lados del horno y están conectadas a éste a través de los conductos de los pórticos de los quemadores. La llama 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 adecuado para grandes instalaciones, ya que facilita la diferenciación de la temperatura a lo largo de la longitud del horno, necesaria para formar las corrientes de convección necesarias.



Horno regenerativo de llama transversal

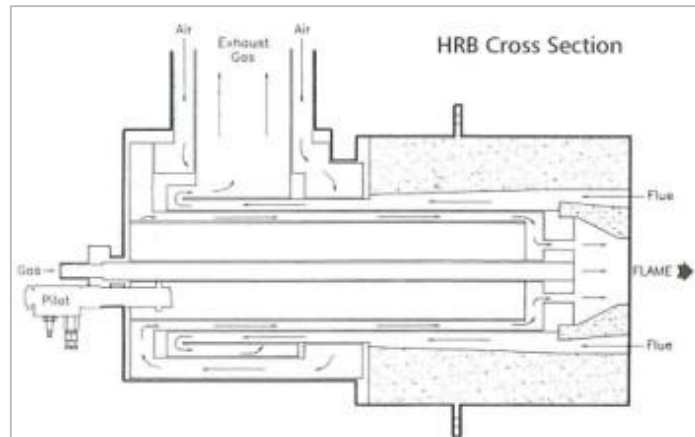
En los **hornos regenerativos de llama de bucle**, los principios de funcionamiento son los mismos aunque las dos cámaras regenerativas están situadas una a cada extremo del horno con un solo pórtico. El camino de las llamas tiene forma de U y retorna al regenerador adyacente a través del segundo pórtico. 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.



Horno regenerativo de llama de bucle

En los **hornos recuperativos**, el calor se recupera a través de intercambiadores de calor (llamados recuperadores). El aire de combustión entrante es precalentado indirectamente por un flujo continuo de gases residuales a través de un intercambiador de calor (normalmente metálico). La temperatura de precalentamiento del aire se limita a 800 °C. Estos hornos son menos eficientes energéticamente que los hornos regenerativos. La capacidad de fusión específica (por unidad de superficie) de los hornos recuperativos es un 30% inferior a la de los regenerativos. Los quemadores están situados a ambos lados del horno, en dirección transversal al flujo de vidrio, y caldean continuamente por ambos lados.

Este tipo de horno se utiliza principalmente cuando se necesita que la explotación sea muy flexible, en especial si el proceso trabaja a una escala demasiado reducida para que el uso de regeneradores sea económicamente viable. Es más adecuado para instalaciones de pequeña capacidad, aunque no es raro hallar hornos de mayor capacidad (hasta 400 toneladas diarias).



En general, las emisiones de NOx expresadas en concentración (mg/Nm^3) muestran valores menores para los hornos recuperativos; mientras que se obtienen valores comparables para hornos regenerativos y recuperativos, si se expresan en $\text{kg NOx}/\text{tonelada}$ de vidrio fundido.

La **oxicombustión** implica la sustitución del aire de combustión por oxígeno (con una pureza superior al 90%). Al eliminar la mayor parte del nitrógeno de la atmósfera de combustión se reduce el volumen de los gases de escape en dos terceras partes. De esta forma, no es necesario calentar el nitrógeno atmosférico a la temperatura de llama, por lo que se reduce el consumo energético. Adicionalmente, se evita en gran medida la formación de NOx de origen térmico. En general, los hornos de oxicombustión tienen un diseño similar a los hornos recuperativos, con varios quemadores laterales y una sola lumbrera de escape de gases. Sin embargo, los hornos diseñados para este tipo de combustión no utilizan sistemas de recuperación de calor para precalentar el oxígeno suministrado a los quemadores.

La tecnología de oxicombustión que está bien consolidada para algunos sectores de fabricación de vidrio, como: filamento continuo, algunos tipos de vidrios especiales; se considera como una tecnología en desarrollo para otros sectores por su elevado riesgo financiero potencial.

La **fusión combinada** por medio de **combustibles fósiles y electricidad**. El refuerzo eléctrico (boosting) es un método de generar calor adicional en el horno haciendo pasar una corriente eléctrica por los electrodos situados en el fondo de la cuba. Esta técnica es comúnmente utilizada en el sector vidriero. Se utiliza para aumentar la producción de un horno de combustible fósil y poder así atender las fluctuaciones en la demanda, sin incurrir en costes fijos de la operación de un horno de tamaño mayor. La técnica puede instalarse mientras el horno está en funcionamiento.

El boosting puede utilizarse también para mejorar el comportamiento medioambiental del horno, sustituyendo la combustión por el calentamiento eléctrico, y reduciendo por tanto los niveles de emisiones atmosféricas emitidos.

Normalmente, el refuerzo eléctrico aporta entre un 5% y un 20% de la energía total, aunque pueden alcanzarse cifras más elevadas. No obstante, porcentajes mayores no se emplean como opción a largo plazo para producción básica debido a los elevados costes operativos asociados.

Los elevados costes asociados al uso de boosting hacen que sea aplicable para la reducción de emisiones a largo plazo. El boosting se utiliza en asociación con técnicas como quemadores de bajo NOx con objeto de mejorar el proceso de fusión y reducir las emisiones, pero no es una medida rentable si se usa de forma aislada. El boosting puede utilizarse también para mejorar las corrientes convectivas en el horno, de forma que se favorezca la transferencia de calor y puede ayudar al afino.

Se puede instalar con el horno de fusión de vidrio en funcionamiento pero es necesario haberlo contemplado con anterioridad en la fase de diseño del horno, ya que requiere un tipo específico de material refractario.

Los **hornos de diseño especial** tienen por objeto mejorar la eficiencia del proceso y atenuar sus efectos en el medio ambiente, especialmente para limitar las emisiones de NOx.

En **Europa**, el tipo de horno de fusión más extendido en el sector de envases de vidrio es el de **tipo regenerativo de bucle** (“*end-fired*”), debido a su versatilidad y amplio rango de capacidad; además presenta una buena eficiencia energética. El utilizado en mayor medida es el de capacidad entre 300 y 350 toneladas/día.

Situación en España

En cuanto a la situación de las empresas de ANFEVI, la siguiente tabla muestra información sobre los hornos utilizados en la fusión de vidrio hueco, así como el número de unidades y representatividad en porcentaje en cada tipo existente:

Características		Número unidades	Representatividad (%)
Tipo horno	Regenerativo bucle (End fired)	19	76%
	Regenerativo transversal (Cross fired)	6	24%
	Para la industria de vidrio hueco, el tipo <u>regenerativo</u> es la única tecnología de hornos presente en España.		
Combustible	Gas natural	20	80%
	Fuel oil	2	8%
	Mezcla y otros	3	12%
	El combustible utilizado en mayor medida es gas natural, aunque en algunos casos, también se utiliza fuel oil (Canarias) o mezcla de gas y fuel oil.		
Boosting	Disponible y se utiliza	21	84%
	Disponible y no se utiliza	2	8%
	No disponible	2	8%

A destacar:

La **fusión** es la parte más importante del proceso productivo, en cuanto a **consumo energético** (representa el 90% del total) y en lo que a **emisiones de NOx** se refiere, en esta etapa del proceso se genera la **totalidad de este tipo de emisiones**.

Tanto en **España** como en **Europa**, el tipo de horno de fusión más extendido en el sector de envases de vidrio es el de **tipo regenerativo de bucle** (“end-fired”), debido a su versatilidad y amplio rango de capacidad; además presenta una buena eficiencia energética.

Este tipo de hornos resulta ser el **más eficiente** si dispone de **boosting** (refuerzo eléctrico) y se utiliza **gas natural como combustible**.

IV. Emisiones asociadas a la etapa de fusión

Los principales problemas medioambientales asociados al sector de vidrio para envases son las emisiones atmosféricas y el consumo de energía. La fabricación de vidrio es un proceso que requiere de altas temperaturas y de un consumo energético elevado, llevando aparejadas las consiguientes emisiones de productos de la combustión y la oxidación térmica del nitrógeno atmosférico, es decir, dióxido de azufre, dióxido de carbono y óxidos de nitrógeno. Las emisiones de los hornos también contienen polvo y concentraciones menores de metales.

Emisiones de NOx en el proceso de fusión

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 vidriera, por lo que no se incluye en el término NOx.

Las principales fuentes de emisión de NOx en las actividades de fusión de vidrio son:

- **NOx térmicos** debido a las altas temperaturas del horno.
- **Descomposición de los compuestos de nitrógeno que contienen las materias primas**
- **Oxidación del nitrógeno** que contienen los combustibles.

El NO 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 de gas natural, el NO del combustible es efectivamente nulo.

Debido a las elevadas temperaturas en los hornos de fusión de vidrio (hasta 1.650°C y 2.000 °C en llama) la principal fuente de NOx es el generado térmicamente, que deriva de la oxidación del nitrógeno en la atmósfera de combustión a temperaturas de más de 1.300°C. Las principales fuentes de nitrógeno son el aire de combustión, el aire de atomización (en los hornos de combustión de fuel oil), y el aire que entra en el horno.

El compuesto predominante es NO, en un porcentaje del 90-95%. 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 nitroso (N₂O) no se detecta en las emisiones.

En hornos de combustibles fósiles, las emisiones de NOx térmico se reducen con la reducción del consumo de combustible. En consecuencia, las técnicas que mejoran la eficiencia energética generan menores emisiones globales de NOx en térmicos de kg NOx por tonelada de vidrio fundido. No obstante, las emisiones (en concentración) no siempre se reducen, particularmente si el volumen de gases residuales son también menores.

La reducción en NOx térmico es el resultado de una combinación de factores, pero en mayor medida de las **temperaturas más bajas y de los niveles reducidos de aire de combustión**.

La experiencia demuestra que las emisiones de NOx son más elevadas en el caso de hornos de gas natural que en el caso de hornos de fuel. La razón principal es que las **llamas de gas tienen una menor emisividad térmica** que las de fuel oil, lo que requiere una mayor temperatura de llama para conseguir la misma transferencia de calor al vidrio fundido, y con ello, condiciones más favorables para la formación de NOx.

A destacar:

Las **emisiones de NOx son más elevadas en el caso de hornos de gas natural que en el caso de hornos de fuel**, debido a la menor emisividad térmica de las llamas de gas frente a las de fuel oil,

V. Técnicas de reducción de NOx

A. Modificaciones en la combustión

La formación de NOx térmico responde a la siguiente fórmula:

$$[\text{NOx}] = A \times \exp(-B/T) \times [\text{N}_2] \times (\text{O}_2)^{0,5} \times t$$

A = constante
 B = constante
 T = temperatura de llama
 t = tiempo de estancia a la temperatura T
 Para gases las relaciones hacen referencia a concentraciones

Por tanto, 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
- el tiempo de estancia en la zona de alta temperatura de llama

Las medidas de control primario del NOx pretenden 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 la generación de NOx de origen térmico son:

- Relación reducida de aire/combustible
 - Eliminación de aire parásito
 - Gestión de la combustión
- Reducción de la temperatura del aire de combustión
- Combustión por etapas
- Recirculación de los gases de combustión
- Quemadores de bajo NOx
- Elección del combustible

Relación reducida de aire/combustible - Eliminación de aire parásito

La entrada de aire en el horno, principalmente alrededor de las boquillas de los quemadores y a través del alimentador de mezclas, puede producir un aumento de los niveles de NOx. El bloque de quemadores puede sellarse fácilmente, y pueden adoptarse medidas para evitar la entrada de aire en la zona de alimentación de mezclas. Estas medidas son bastante eficaces y no suponen un coste excesivo. La reducción de los niveles de NOx que se puede obtener depende de la situación de partida, pero puede alcanzar hasta un 10%.

Relación reducida de aire/combustible - Gestión de la combustión

Normalmente, los hornos operan con un exceso de aire de entre el 5-10% (1-2% de exceso de oxígeno) para asegurar una combustión completa. Reduciendo la relación aire/combustible a niveles casi estequiométricos pueden conseguirse reducciones significativas de NOx, y adicionalmente mejora de la eficiencia energética. Para aplicar la técnica de forma efectiva, es necesario medir los niveles de NO, CO y O₂. En el caso de que la reacción de combustión sea subestoequiométrica, los niveles de CO y el desgaste del material refractario podrían aumentar, y además podría alterarse el nivel redox del vidrio, afectando a su calidad.

Reducción de la temperatura del aire de combustión

La temperatura de llama puede reducirse bajando la temperatura de precalentamiento del aire de combustión. En hornos recuperativos las temperaturas del aire de combustión son considerablemente menores que en los hornos regenerativos, lo que hace que las temperaturas de llama y por tanto, las concentraciones de NOx sean menores. No obstante, la menor temperatura de precalentamiento del aire tiene como consecuencia una menor eficacia del horno (menor productividad específica), una menor eficacia del combustible (mayor demanda de combustible) y potencialmente mayores emisiones (kg/tonelada de vidrio) de NOx, CO₂, óxidos de azufre, partículas, etc. Por lo tanto, en global, es improbable que esta técnica sea adecuada desde el punto de vista medioambiental y económico. No obstante, la aplicabilidad de esta técnica se limita a hornos de tipo recuperativos.

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 cercana a la toma y una zona secundaria más fría adelante. La mayor parte del NOx generado se produce en la zona más caliente. Por lo tanto, reduciendo la proporción de aire o de combustible inyectado en el quemador, se reduce la temperatura máxima y la formación de NOx. El combustible o aire restante se añaden posteriormente en la zona de combustión.

La combustión por etapas de aire supone una combustión subestequiométrica, y es necesario aportar el aire y el oxígeno restante en el horno hasta conseguir 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 en EEUU.

La distribución de aire es de aplicación limitada debido a su complejidad técnica. A fecha 2010, no hay información disponible en relación con la aplicación de la combustión en etapas.

En el caso de la combustión por etapas de combustible se basan en la formación de una llama de gas de bajo impulso (alrededor del 10% de la energía total) en el cuello de la toma del inyector. 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. De esta forma, se reduce la formación de NOx. Esta técnica ha sido aplicada ampliamente en la industria vidriera en hornos convencionales. A fecha 2010, no se han previsto mejoras adicionales con el uso de esta técnica.

La distribución de combustible es aplicable a la mayoría de hornos aire/combustible.

Recirculación de los gases de combustión

Los gases residuales del horno pueden reinyectarse en la llama, para reducir el contenido de oxígeno y por tanto, de la temperatura y la formación de NOx. La aplicación de esta técnica en la industria vidriera ha tenido dificultades.

La aplicabilidad de esta técnica está limitada a la utilización de quemadores especiales con recirculación automática de gases residuales. No es aplicable a hornos regenerativos.

Quemadores de bajo NOx

Se trata de un término que abarca una serie de sistemas de quemadores patentados o desarrollados por empresas vidrieras, diseñados para minimizar la formación de NOx. Estos sistemas pueden variar en cuanto a sus principios y las características incorporadas. Existen diferencias entre los sistemas de combustión a gas y los de combustión de fuel oil. Las principales características de estos quemadores son:

- La mezcla del combustible y del aire se realiza más lentamente, con objeto de reducir la temperatura máxima de llama (*flame shaping-modelado de llamas*).
- Velocidades de inyección mínimas que permitan una combustión completa.
- El incremento de la emisividad (radiación) de la llama, con optimización de la transferencia de calor al vidrio fundido.
- Bocas diferentes y diseños de bocas que permitan generar múltiples chorros de combustible por quemador.
- Combustión completa con mínimo ratio aire/combustible

Los beneficios ambientales alcanzados son generalmente más bajos para aplicaciones en hornos de combustión de llama transversal a gas, debido a condicionamientos técnicos y a un menor grado de flexibilidad del horno.

Los mejores resultados se obtienen en caso de reconstrucción normal o total del horno, combinado con una mejor geometría y diseño del mismo.

Elección del combustible

La experiencia en la industria vidriera confirma que las emisiones de NOx en hornos de combustión a gas son superiores a las de hornos de combustión a fuel oil. La experiencia demuestra que, típicamente, las emisiones de NOx son más elevadas en el caso de hornos de gas natural (del orden del 25-40%, dependiendo el tipo de horno y la aplicación) que en el caso de hornos a fuel oil. También se observa que los consumos energéticos son un 5% inferiores con el uso de fuel frente al uso de gas natural. La razón principal es que las llamas de gas tienen una menor emisividad térmica que las de fuel oil, lo que requiere una mayor temperatura de llama para conseguir la misma transferencia de calor al vidrio fundido, y con ello, condiciones más favorables para la formación de NOx.

La elección entre gas natural y fuel oil depende en amplia medida de las condiciones económicas actuales y de las políticas energéticas de los Estados Miembros. En general, viene condicionado por la jerarquía de prioridades que impone cada Estado en función de sus políticas energéticas, que obedecen a intereses macroeconómicos, a compromisos y relaciones internacionales o a estrategias a largo plazo. En todo caso, el cambio de gas natural por fuel oil como combustible en hornos de fusión de vidrio, no debe considerarse como alternativa viable para la reducción de las emisiones a la atmósfera de óxidos de nitrógeno (NOx), ya que la utilización de gas natural como combustible viene impuesta por la Política Energética del país (en este caso, España).

Un aspecto relevante es el contenido de nitrógeno en el gas natural (poco relevante de forma natural, pero que puede ser mayor en algunas situaciones utilizado para controlar el *Poder Calorífico* o el *Índice de Wobbe*, por cuestiones de seguridad), que es elevado en algunos países, e incluso, produce mayores emisiones de NOx.

El contenido de nitrógeno en el gas natural, también varía de forma considerable en los diferentes países miembros; por ejemplo en Portugal, el valor medio se sitúa en 5,3%, mientras que en Francia se sitúa en 0,6%, y en Rusia 1,2%.

Beneficios ambientales alcanzables por modificaciones de la combustión

Los efectos de las diferentes modificaciones de la combustión no son acumulativos, ya que generalmente se trata de diferentes formas de alcanzar los mismos objetivos generales; es decir, una reducción del 10% conseguida con 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; para un horno en el que no se hayan utilizado estas técnicas, cabe esperar reducciones de las emisiones de NOx del 40 - 60% en la mayoría de las aplicaciones.

Los niveles de emisiones actuales alcanzables con estas técnicas varían considerablemente según el punto de partida, la edad y diseño del horno, y particularmente según el rigor con el que se apliquen y controlen dichas medidas. Durante la última década, la industria vidriera ha realizado progresos considerables en la minimización de emisiones de NOx mediante modificaciones en la combustión, dedicado gran cantidad de recursos a este trabajo.

Según datos del año 2005 (FEVE), relativos a la aplicación de técnicas primarias en hornos de vidrio de envases, los niveles de emisiones de NOx en concentración alcanzan los siguientes valores medios:

Combustible	Emisiones de NOx (mg/Nm ³)
Gas natural	1.000
Fuel oil	750

Se muestran datos de las características de funcionamiento y niveles de emisión de NOx en dos plantas situadas en Alemania:

	HA	HB
Combustible	Gas natural	Gas natural + fuel oil
Tipo de horno	Regenerativo Llama transversal	Regenerativo Llama bucle
Capacidad máxima (t/día)	350	300
Producción actual (t/día)	275	297
Boosting	Si	No
Color	Flint	Ámbar
Casco (%)	60%	72%
Medidas primarias	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Relación reducida de aire/combustible ▪ Medidas de sellado ▪ Diseño de horno ▪ Modificaciones de quemadores 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Relación reducida de aire/combustible ▪ Medidas de sellado ▪ Ajuste lambda (sensor de oxígeno) ▪ Diseño de horno Modificaciones de quemadores
Consumo energético (GJ/t)	3,78	4,21
Emisiones de NOx Gas seco 8% O2	909	507

Fuente: Germany-HVG Glass Industry report 2007

Es necesario mencionar que los valores mostrados en la tabla adjunta vienen condicionados por la situación del país en la que encuentran ubicadas. Como se puede comprobar los niveles de casco incorporado al proceso son muy elevados, en algunos casos hasta del 72%. Esta situación es posible ya que Alemania es un país netamente importador de envases y además cuenta con un sistema de recogida selectiva de vidrio por colores, lo que permite niveles mayores de reciclado de vidrio. De esta forma, las empresas vidrieras disponen de mayores cantidades de casco para alimentar al proceso, y además clasificadas por colores.

Por el contrario, España es un país netamente exportador (tanto de envases vacíos como llenos) por lo que las cantidades de casco recogida son menores. Además no se realiza una recogida de los residuos de vidrio por colores (blanco y color). Nota: cuando se fabrica vidrio blanco, solamente se puede alimentar al horno residuos de vidrio procedentes de rechazo interno y casco externo de color blanco.

En este punto, es necesario recalcar que un dato, en este caso de niveles de emisión de NOx tiene validez cuando va acompañado tanto de las circunstancias que lo afectan (tipo de energía y porcentaje de casco) como del modo de obtención (norma empleada, niveles de detección de los aparatos, grado de incertidumbre y si la toma de muestra ha sido realizada en continuo o puntualmente y en este caso cómo).

Para conocer en detalle la situación de las plantas vidrieras en España, se muestran en la tabla adjunta los datos relativos a las características de los hornos, emisiones de NOx asociadas (datos 2010-2012), el consumo energético y las medidas primarias implantadas, para las siguientes tecnologías tipo:

- 1 Horno regenerativo llama bucle (Tipo H1)
- 2 Hornos regenerativos llama bucle con chimenea común (Tipo H2+H3)
- 1 Horno regenerativo llama transversal (Tipo H4)

Se considera **necesario aportar la información completa**, ya que los **niveles de emisión de NOx** no pueden aportarse únicamente como un valor de forma aislada, sino que **debe referenciarse a un tipo de horno, tipo de combustible, consumo energético asociado, porcentaje de boosting (apoyo eléctrico) y porcentaje de casco**.

	Tipo H1	Tipo H2+H3		Tipo H4
Combustible	Gas natural	Gas natural	Gas natural	Gas natural
Tipo de horno	Regenerativo Llama bucle	Regenerativo Llama bucle	Regenerativo Llama bucle	Regenerativo Llama transversal
Producción actual (t/día) <small>Intervalo años 2010-2012</small>	315 - 331	244 - 423		229 - 247
Boosting	SI	SI	SI	SI
Color (B/C)	C	B/C	B	B
Casco (%) <small>Promedio años 2010-2012</small>	61%	11% - 21%		26%
Boosting (kWh/t) <small>Promedio años 2010-2012</small>	74	35 - 115		15
Boosting (%) <small>Promedio años 2010-2012</small>	6%	2% - 8%		1%
Medidas primarias implantadas	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Reducción relación aire/combustible ▪ Quemadores de bajo NOx ▪ Boosting 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Reducción relación aire/combustible ▪ Quemadores de bajo NOx ▪ Boosting 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Reducción relación aire/combustible ▪ Quemadores de bajo NOx ▪ Boosting 	
Consumo energético (GJ/t) <small>Intervalo años 2010-2012</small>	3,84 - 3,98	4,11 - 5,17		5,58 - 6,06

	Tipo H1	Tipo H2+H3	Tipo H4
Emisiones de NOx (año 2010) Gas seco, 8% O2	933	909 - 1.189	955
Emisiones de NOx (año 2011) Gas seco, 8% O2	920	1.043 - 1.110	993
Emisiones de NOx (año 2012) Gas seco, 8% O2	927	896 - 989	993
Emisiones de NOx (año 2013) Gas seco, 8% O2	---	833 - 1.100	---
Valor medio periodo 2010-2013	927	990 - 1.027	980

Fuente: elaboración propia (ANFEVI)

Efectos cruzados

El principal efecto cruzado asociado a la aplicación de la mayoría de las técnicas de modificación de la combustión es la emisión de monóxido de carbono (CO), debido a las condiciones de combustión subestioquiométrica, con potenciales problemas en recuperadores y regeneradores donde el CO es generalmente oxidado a CO₂.

Uno de los aspectos claves para la minimización de las emisiones de NOx es llevar la combustión lo más estequiométrica posible. Lo que puede incluso conducir a combustión no completa y a presencia de CO. El uso de gas natural como combustible obliga a ajustar mucho más la combustión, provocando la presencia de CO. La presencia de CO puede dañar las cámaras de regeneración, siendo necesaria en casos extremos la reconstrucción de las mismas hasta de su periodo de amortización (10 años).

Adicionalmente, el término de la combustión puede tener lugar en la parte superior de los regeneradores, lo que puede causar un incremento de la temperatura, que genere niveles mayores de SOx, debido al fenómeno de volatilización de los sulfatos depositados en la superficie de los regeneradores.

Por otro lado, el cambio de combustible, de gas natural a fuel oil para mejorar la emisividad de la llama y por lo tanto, reducir las emisiones de NOx, puede conducir a un incremento significativo de las emisiones de SOx, asociadas al contenido de azufre en el fuel oil. Además el uso de fuel puede tener efecto en las emisiones de CO₂, debido a su mayor contenido el carbono.

Datos operacionales

En general, los hornos regenerativos de llama en bucle generan menores niveles de emisión de NOx, que los regenerativos de llama transversal, y las técnicas de modificación de la combustión son más eficaces en hornos de tipo llama en bucle. Nota: la mayoría de los hornos instalados en las plantas vidrieras de ANFEVI son de tipo llama bucle (19 hornos de llama de bucle frente 6 de tipo llama transversal).

En el sector de fabricación de envases y según datos recogidos en el documento *Best Available Techniques Reference Document for the Manufacture of Glass 2013*, se han conseguido niveles de emisión de 700 – 1.100 mg/Nm³ (0,9 – 2 kg/t de vidrio) para hornos de llama transversal. En el caso de hornos de llama bucle, los valores alcanzan valores 550 – 800 mg/Nm³ y menos de 1,5 kg/t de vidrio.

Los resultados para hornos recuperativos son más variables, que puede ser debido a los diferentes usos de este tipo de hornos.

Las principales ventajas y desventajas de la aplicación de medidas de modificación de la combustión son:

VENTAJAS	DESVENTAJAS
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Bajos costes relativos ▪ Se consiguen reducciones sustanciales en las emisiones de NOx para la mayoría de tipos de hornos ▪ Aplicables tanto a hornos nuevos como existentes (aunque en algunos casos solamente en reparaciones) ▪ Estas técnicas no generan ningún aspecto medioambiental significativo (efectos cruzados) ▪ Pueden producir a menudo un ahorro significativo de energía. ▪ Las menores temperaturas del horno y el menor consumo de energía tienen como consecuencia menores emisiones globales. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Se requiere cierto expertise para obtener los mejores resultados (tanto durante arranques como en operación normal) ▪ Puede ser necesario modificar el diseño del horno para obtener los mejores resultados ▪ Hay que prestar atención a los posibles cambios redox, que pueden afectar a la calidad del vidrio ▪ Deben controlarse los niveles de CO para evitar daños en el materia refractario del horno ▪ La atmósfera más reductora puede causar un incremento de las emisiones de SO₂

Aplicabilidad

Como se ha comentado con anterioridad, la aplicabilidad de esta técnica está limitada por la disponibilidad de los diferentes tipos de combustible, determinada por las políticas energéticas de los Estados Miembros.

En principio (con las limitaciones indicadas), estas técnicas son aplicables a todos los hornos convencionales de combustibles fósiles. La mayoría de las técnicas pueden aplicarse tanto a hornos existentes como a hornos nuevos. No obstante, los beneficios de algunas técnicas (por ejemplo, quemadores de bajo 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 del operador y de los recursos técnicos. La optimización de los sistemas requiere de un periodo de experimentación y control, así como un alto grado de experiencia y *expertise*. Para aquellas empresas que no disponen de estos recursos, existen asesores especializados que ofrecen servicios para optimizar y modificar las operaciones de combustión. Este trabajo de desarrollo, por supuesto, incrementa el coste de las técnicas.

La tendencia de todo el sector vidriero es mejorar de forma progresiva el proceso, mediante la extensión en el uso de estas técnicas cuando sea posible, así como tratar de determinar los niveles de emisión que podrían alcanzarse en el futuro con técnicas primarias.

En el caso concreto de las empresas de ANFEVI, **se han venido adoptando medidas primarias que han permitido alcanzar para el periodo 2010-2014, unos niveles de emisión de NOx**, en concentración, en el intervalo:

900 – 1.100 mg/Nm³

Adicionalmente a **partir de esta fecha, se propone ampliar y extender la implantación de medidas primarias de reducción de las emisiones de NOx y mejora de la eficiencia energética**, de forma que se consigan en **2016** niveles de emisión de:

800 mg/Nm³

Costes

Los costes incluyen la compra de quemadores regulables, materiales refractarios más caros para los regeneradores, sensores de oxígeno (para hornos de llama transversal, se requiere mayor número de sensores y sistema de control más complejo que para hornos de tipo llama bucle), unidad de control para el ratio aire/combustible, mantenimiento y mano de obra para modificar y revisar los ajustes de los quemadores.

Algunos datos respecto a costes por tipo de horno:

	Hornos regenerativos tipo llama bucle	Hornos regenerativos tipo llama transversal
Sustitución de quemadores y cambio de bloque de quemadores ("burner blocks")	50.000 – 100.000 €	> 300.000 – 400.000 €
Sistema sensor de oxígeno	20.000 – 25.000 €	60.000 – 125.000 €

Fuente: Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Manufacture of Glass 2013. Datos año 2008.

En el caso de cambios en el diseño de los hornos, se tienen que considerar gastos de inversión adicionales para los materiales refractarios y la construcción metálica, y esta cantidad puede alcanzar 700.000 € para hornos de vidrio hueco tipo llama bucle.

Los costes de las modificaciones en la combustión son relativamente más bajos y a veces pueden compensarse con los menores costes operativos asociados a los ahorros de energía conseguidos. El coste de los quemadores supone un coste de sustitución, no un coste adicional, y para un horno nuevo, el extra coste no sería muy superior.

Estas técnicas primarias, combinadas con la optimización de la formulación, son en general más económicas que las técnicas de eliminación secundarias.

Fuerza motriz para la implantación

La **mejora e implementación de las medidas primarias** para la reducción de las emisiones de NOx están **basadas en la adopción de medidas para evitar la formación de NOx**. En general, se consigue:

- ✓ mejor impacto ambiental global que las técnicas de fin de línea (tipo SCR, SNCR,...)
- ✓ menor impacto económico
- ✓ potencial para ahorros de energía y en consecuencia, reducción en la emisión de otros contaminantes, como por ejemplo: CO₂.

Siempre que sea factible la introducción de medidas primarias y secundarias en el mismo horno, debería realizarse un estudio técnico-económico (considerando también los “efectos cruzados”) para determinar si está justificado ambiental y económicamente la adopción de dichas medidas.

En particular, si **con la adopción de medidas primarias** se ha conseguido o se prevé **conseguir un cierto nivel de emisiones**, la decisión de si un gasto adicional en **medidas secundarias** está justificado, debería tener en cuenta primero los **niveles que se pueden conseguir con estas técnicas primarias**.

B. 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 ellos menores niveles de NOx. El más conocido es el tipo 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®.

El horno de fusión **LoNOx®** (bajo en NOx) utiliza una combinación de afinado en baño poco profundo y de precalentamiento de las materias primas, con el objeto de conseguir emisiones reducidas de NOx, potencialmente sin la penalización de una reducción en el comportamiento térmico. Este tipo de hornos puede operar a temperaturas más bajas que hornos convencionales comparables.

Otro diseño es el **Flex® Melter**, 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.

También el diseño de los hornos de tipo regenerativo puede ser modificado, con la introducción de **medidas primarias avanzadas** con el objetivo de reducir las emisiones de NOx. En general, los parámetros más importantes de diseño del horno, con respecto a la formación de NOx son:

- Tipo de horno
- Número de quemadores en operación
- Ángulo de quemadores
- Ángulo del pórtico del quemador
- Tamaño del pórtico del quemador (que determina la velocidad del aire de entrada en la cámara de combustión)
- Distancia entre quemador/pórtico del quemador
- Altura y tamaño de las cámaras de combustión (en general, tamaños mayores están asociadas a menores emisiones de NOx y ligeramente incrementado el consumo energético del horno)
- Geometría de llama en relación con la cámara de combustión.

C. Fusión con oxidación

La fusión con oxidación 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 oxidación 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 los hornos modernos, la geometría está optimizada para combustión de oxidación 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 conseguir ahorros de energía, ya que no es necesario calentar el nitrógeno atmosférico a la temperatura de llama. Debe calentarse menos gas y por consiguiente se pierde menos energía del horno. El alcance del ahorro energético depende en gran medida del horno con que se compara. Además, el ahorro global debe ser evaluado teniendo en cuenta la energía indirecta relativa al uso de oxidación.

Cuando se evalúe el funcionamiento de un horno de oxidación frente a un horno convencional (combustible/aire) hay que tener en cuenta la eficiencia del sistema de recuperación de calor de gases residuales (recuperador, regenerador, etc.), así como la energía necesaria para producir oxígeno.

La formación de NOx se reduce considerablemente, ya que la principal fuente de nitrógeno es menor, aunque sigue habiendo algo de nitrógeno en la atmósfera de combustión, que procede de: nitrógeno residual procedente de oxígeno, nitrógeno del combustible, 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 nitrógeno pueden resultar significativos. Por tanto, es importante minimizar la entrada de aire en el horno.

El volumen del gas residual del horno es de 4 a 7 veces inferior a la de hornos de combustión con aire; la temperatura del gas residual puede ser muy alta (1.200°C – 1.450°C) y normalmente requerirá refrigeración. Debido al elevado contenido en agua y a la concentración en compuestos corrosivos (cloruros y sulfatos), el enfriamiento se realiza normalmente mediante dilución con aire. Después de la dilución, los volúmenes de gas residual están entre un 30 – 100% del volumen de gas de hornos convencionales, dependiendo del grado de dilución necesario.

La fusión con oxicomustión requiere diseños de quemadores distintos a los utilizados en la combustión convencional con aire-gas. Este tipo de quemadores ha tenido un desarrollo sustancial, llegándose a desarrollar quemadores de bajo NOx altamente especializados, desarrollados específicamente para la fabricación de vidrio.

Es recomendable retrasar la instalación de esta tecnología hasta la reconstrucción del horno para potenciar al máximo los posibles beneficios y evitar los problemas previstos anticipados.

El oxígeno requerido para la combustión puede provenir del suministro directo al centro o de su producción in situ. No obstante, las cantidades requeridas hacen que normalmente sea más económico producir in situ el oxígeno. No obstante, si una planta está situada cerca de un conducto de oxígeno industrial, normalmente es más económico obtener el oxígeno directamente del conducto. 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.

Está técnica es aplicada principalmente en el sector de fibra de vidrio de filamento continuo y vidrios especiales; mientras que su uso en el resto de sectores vidrieros está siendo limitado por una serie de factores como: capacidad del horno (más de 500 t/d), selección de refractario óptimo, prevención y estabilización de la formación de espuma, sistema de recuperación de calor de gases,...

Su aplicación en el sector de vidrio plano y vidriero hueco, está limitada por los elevados costes del oxígeno y la necesidad de material refractario de elevada calidad.

Debido a la complejidad de los aspectos asociados a esta técnica, se considera de interés incluir las siguientes conclusiones:

VENTAJAS	DESVENTAJAS
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Pueden conseguirse reducciones sustanciales en las emisiones de NOx (< 0,5 – 0,8 kg/tvf para vidrio de envases sosa-cal) ▪ 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 en un horno de recuperación) ▪ Potencial de menores emisiones de compuestos volátiles y partículas, expresadas en caudal másico, cuando los volúmenes de gas residual se reducen. Esto puede reducir los costes de inversión asociados al equipo de tratamiento de efluentes ▪ Potencial de mejora de producción de vidrio por m² y mejor control de proceso ▪ En algunos casos, se podría mejorar la calidad del vidrio ▪ Podría facilitar la captura de CO₂, debido a la elevada concentración de gases de combustión 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Si no se consiguen ahorros sustanciales de energía, la técnica puede resultar cara, especialmente para grandes hornos de vidrio sosa-cal. Se debe a la diferencia de coste de los combustibles (gas/fuel oil) comparada con la electricidad ▪ La eficacia de costes varía ampliamente entre las diferentes aplicaciones y debe determinarse individualmente ▪ Puede haber problemas con el desgaste del material refractario, lo que reduce la vida del horno, que actualmente no han sido resueltos completamente ▪ La producción de oxígeno requiere consumo adicional de energía eléctrica, del orden del 7% del consumo del horno, pero superior al 20%, si se expresa como energía primaria ▪ La técnica es esencialmente una medida primaria por cuanto reduce la formación de NOx, pero no es útil para la reducción de NOx de fuentes no térmicas ▪ La técnica tiene mayor eficacia si se combina con la reconstrucción del horno ▪ El almacenamiento, producción y uso de oxígeno tiene riesgos inherentes, por lo que hay que realizar estudios de seguridad previos ▪ La producción de oxígeno genera emisiones de ruido, que deben controlarse ▪ Se pueden dar emisiones extra de SOx debido a que la retención de azufre en el vidrio puede reducirse por los ajustes de la cantidad de sulfatos en la composición ▪ Podría darse fenómeno de formación de espuma - espumación (<i>foaming</i>) en el horno de fusión ▪ Cuando se requiere un alto nivel de calidad del vidrio, el uso de esta técnica podría estar restringida debido al deterioro potencial del material refractario del horno

D. Reducción química por combustible (CRF – Chemical Reduction by Fuel)

La reducción química por combustible consiste en la alimentación del 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, pero a fecha 2010 el proceso de Recombustión no ha demostrado todavía su aplicación a escala de producción en la industria vidriera.

Proceso 3R

La base del proceso 3R es la adición de un combustible a base de hidrocarburos (gas natural o fuel oil) de forma controlada en la corriente de gas natural 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 3R hace referencia a Reacción y Reducción en Regeneradores.

Los niveles de emisión de NOx en hornos regenerativos de vidrio plano y vidrio hueco se sitúan en el rango de 1,0 – 1,5 kg/t de vidrio fundido. Los proveedores de esta tecnología afirman que los niveles de reducción de NOx pueden alcanzar entre 70-85% y niveles de emisión inferiores a 500 mg/Nm³.

Uno de los principales inconvenientes del proceso 3R es que con el uso de combustibles a base de hidrocarburos para conseguir la reducción de las emisiones de NOx, supone un coste y produce un incremento de las emisiones de CO₂. Es por esto, que en su aplicación esta técnica se combina con otras medidas primarias de reducción de NOx convencionales, con el fin de reducir el consumo de combustible del proceso 3R.

El proceso 3R está principalmente implantado en la industria de vidrio *float* (vidrio plano), con muy pocas aplicaciones en otros sectores. Esto se debe fundamentalmente a que la atmosfera reductora creada en los regeneradores puede dañar ciertos tipos de materiales refractarios, particularmente si se dan asimismo altas temperaturas.

E. Reducción Catalítica Selectiva (SCR)

La técnica denominada SCR consiste en la reacción del NOx con amoníaco NH₃ en un lecho catalítico a la temperatura apropiada. Se utilizan diferentes catalizadores, y cada uno opera en un intervalo de temperaturas. Los catalizadores más utilizados son óxidos de vanadio y titanio, impregnados sobre un substrato metálico o cerámico. Independientemente del catalizador empleado, es importante mantener la temperatura operativa correcta, entre 200°C a 500°C, siendo el rango óptimo entre 300°C y 450°C.

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 de NH₃:NOx, pero esta se mantiene normalmente por debajo de 1,1:1 para minimizar la penetración de amoníaco.

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 obstrucciones y corrosión del equipo, Algunas partículas de metales alcalinos (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 SCR. Esta unidad debe reducir la concentración de polvo (partículas) a una concentración de 10-15 mg/Nm³, y es casi siempre un precipitador electrostático. Las bajas temperaturas operativas de los filtros de mangas harían necesario calentar el gas residual a la temperatura de reacción de catalizador, lo que aumentaría mucho los costes operativos y en general se consideraría como algo prohibitivo desde el punto de vista económico. 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 de un precipitador electrostático significa que, en muchos casos, debe instalarse asimismo un sistema de lavado de gases ácidos antes del precipitador.

Beneficio ambiental

Los niveles de emisiones de NOx alcanzados dependerán principalmente de la concentración de entrada y de la cantidad de catalizador y amoníaco utilizado. El nivel de amoníaco se mantiene normalmente por debajo de 1,1:1 para minimizar la penetración de amoníaco. Se han reportado niveles de concentración por debajo de 500 mg/Nm³ para algunas aplicaciones en el sector con la aplicación de 2 lechos catalíticos. Se han reportado valores más altos, próximos a 700 mg/Nm³ para instalaciones con un lecho catalítico.

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 implantación de medidas primarias de reducción de NOx, las emisiones de los hornos de vidrio más típicas serían del orden de 1.200 mg/Nm³ a 2.000 mg/Nm³, y una reducción del 80-90% daría valores que van desde menos de 200 mg/Nm³ a 500 mg/Nm³. Si se combina con medidas primarias, pueden anticiparse cifras más bajas, pero en este caso, se deben tener en consideración los costes totales y los efectos cruzados, en particular por tonelada de NOx reducida.

En la práctica, los valores actuales para las aplicaciones de vidrio plano y vidrio hueco, están en el rango 400-800 mg/Nm³, con eficiencias de reducción del 70 – 80%, dependiendo de la concentración inicial de NOx.

Para el sector de vidrio hueco (envases de vidrio), no se dispone actualmente de datos reales de emisión de NOx, en concentración. Los datos (del año 2007) que se recogen en el documento Bref europeo (2013) corresponden a una empresa localizada en Alemania, que a fecha actual, está fuera de funcionamiento.

Por otro lado, el sector conoce la existencia de una planta de fabricación de envases de vidrio localizada en Irlanda, y de propiedad pública, que cuenta con un sistema de tratamiento de emisiones de NOx mediante tecnología SCR (Reducción Catalítica Selectiva). No obstante, se desconocen los niveles de emisión (en concentración mg/Nm³) alcanzados.

Efectos cruzados

El principal efecto cruzado asociado a la aplicación de la técnica SCR es la emisión de amoníaco, el uso de energía eléctrica y la producción de residuos del catalizador gastado.

El uso de amoníaco está asociado no solamente con la emisión de solución que no ha reaccionado sino también con los requisitos legales en materia de seguridad y medio ambiente para el transporte, almacenamiento y uso de amoníaco (*Directiva 96/82/UE y Directiva 2003/105/UE, sobre prevención y control de accidentes mayores en los que intervienen sustancias peligrosas*). También hay que considerar las emisiones indirectas asociadas a la producción de amoníaco.

Las emisiones de amoníaco son un elemento de preocupación y pueden ser un factor limitante de la eficacia de la técnica.

Normalmente un lecho de catalizador adicional puede reducir las emisiones de amoníaco e incrementar la posibilidad de reducir los niveles de NOx (eliminación total > 80%). No obstante, hay que considerar que la mejora conseguida supone un coste adicional.

El uso de electricidad (necesidad de mayor capacidad de aspiración y aire presurizado para la limpieza de los módulos de catalizador; y para atomizar la solución de amoníaco en los gases) y el consumo de amoníaco están asociados con las emisiones indirectas (NOx y CO₂) relativas a su producción.

Se generan residuos del catalizador cuando éste tiene que ser renovados al finalizar su vida útil. La vida del catalizador puede ser de 4-5 años y el volumen de residuos de catalizador puede alcanzar 20 m³ para un horno float de 700 toneladas/día.

Datos operacionales

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.

Se muestra a continuación ejemplos de instalaciones que producen vidrio plano, hueco y especial, en las que la técnica SCR se utiliza en combinación con precipitador electrostático y una etapa de scrubber seco.

	SECTOR VIDRIO HUECO	SECTOR VIDRIO PLANO	SECTOR VIDRIO ESPECIAL
Combustible	Gas natural	Gas natural	Gas natural / Fuel oil ligero
Tipo de horno	Llama bucle (4 hornos)	Float	Regenerativo Llama transversal
Producción (toneladas/día)	640 t/d	600 t/d	170 t/d
Instalación SCR	Panal catalítico de 2 lechos	Panal catalítico de 1 lecho	Panal catalítico de 10 m ³ de volumen
Agente reductor	Solución de NH ₃ al 25%	Solución de NH ₃ al 25%	Solución de NH ₃ al 25%
Consumo de agente reductor (litros/hora)	145 l/h	200 l/h	No disponible
Niveles de Emisión Asociados (AELs)	Valores medios semihorarios	Valores medios semihorarios	Valores medios semihorarios
Emisiones de NOx			
<i>mg/Nm³, gas seco al 8% de O₂</i>	456	700	950
<i>Kg/ tonelada de vidrio</i>	0,97 (1)	1,12	6,05
<i>Eficiencia eliminación de NOx</i>	75%	71%	82%
Emisiones de NH₃			
<i>mg/Nm³, gas seco al 8% de O₂</i>	19,5	< 30 (2)	20
Notas	La instalación cuenta con 4 hornos. (1) el valor ha sido calculado basado en la información suministrada (caudal, volumen de gases residuales, vidrio fundido, concentración de emisiones).	La instalación está equipada con monitorización en continuo de NOx, NH ₃ y otros parámetros. (2) el dato se refiere a medida puntual. Se han medido concentraciones medias de 10 mg/Nm ³ continuamente.	La instalación está equipada con sistema de recuperación de calor. La formulación de la mezcla contiene nitratos.

Nota: La planta de vidrio hueco, localizada en Alemania, tiene actualmente (junio 2014) inoperativo el sistema SCR. Los datos relativos a esta planta son la única referencia del sector de fabricación de envases de vidrio, cuanto a niveles de emisión de NOx con tecnología SCR, según se recoge en el documento Bref del sector (2013).

Del análisis de los datos reflejados en la tabla adjunta y teniendo en cuenta los niveles de emisión de NOx en concentración alcanzados, si parece necesario en algunos sectores (como vidrio plano o vidrio especial) la adopción de medidas secundarias para alcanzar niveles de emisión niveles entre 700 – 950 mg/Nm³, similares a los que se obtienen en el sector de vidrio hueco con la adopción de medidas primarias.

Las principales ventajas y desventajas asociadas a la aplicación de la técnica SCR son:

VENTAJAS	DESVENTAJAS
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Muy alta eficacia de reducción de NOx. ▪ Reduce el NOx de todas las fuentes del horno, no solamente el NOx de origen térmico. ▪ Puede formar parte de un sistema integrado de control de la contaminación atmosférica. ▪ Numerosos ejemplos dentro de la industria del vidrio (en algunos sectores) y en otros sectores industriales. ▪ Los proveedores suelen ofrecer garantías de eficacia. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Hay aspectos técnicos aún por resolver en algunas aplicaciones (por ejemplo: algunos vidrios que contienen boro). ▪ Se consume amoníaco y parte de éste se emite a la atmósfera. Se producen efectos cruzados debido a la producción de amoníaco, y deben considerarse los aspectos ambientales y de seguridad asociados al almacenamiento y manipulación del mismo ▪ El sistema consume energía. ▪ Debe instalarse con sistemas de eliminación de polvo y lavado de gases ácidos, ya que se requieren bajos niveles de polvo (partículas) y SO₂. ▪ Coste de inversión relativamente alto, particularmente para plantas pequeñas. ▪ Altos requisitos de espacio físico en planta. ▪ Su relativa ventaja en coste se ve reducida por los desarrollos en otras técnicas más baratas. ▪ Se mantienen las dudas sobre la vida útil de los catalizadores. ▪ La temperatura operativa limita las posibilidades de recuperación de calor. ▪ En el caso de hornos recuperativos, puede ser necesario refrigeración del gas. ▪ Debido a la temperatura de operación mínima requerida, la técnica SCR no es compatible con el uso de filtros de mangas salvo que el gas residual sea recalentado.

Referencia: Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Manufacture of Glass 2013.

Aplicabilidad

En principio, la técnica SCR puede aplicarse a la mayoría de procesos de la industria vidriera, tanto a instalaciones nuevas como existentes. No obstante, hay una serie de aspectos que limitan seriamente la aplicación de dicha técnica en ciertos casos.

Elevados niveles de SO₂ en el gas de combustión puede formar bisulfato amónico y causar el envenenamiento del catalizador y corrosión. Esta situación también puede darse en hornos con combustión a gas con elevados niveles de sulfato. Para evitar este problema, es necesario mantener la temperatura del gas de combustión por encima de 330°C. Uno de los aspectos clave de los costes de la técnica SCR es la vida útil del catalizador, que puede reducirse significativamente en caso de envenenamiento.

La técnica SCR requiere para su implantación muchos espacio físico, particularmente si las unidades de lavado y filtrado no están instaladas. En algunas plantas existentes en las que el espacio disponible es limitado, esto puede aumentar considerablemente el coste de la técnica, o en algunos casos hacer que sea prohibitiva desde el punto de vista económico.

Otro factor determinante en la aplicación de la técnica SCR es la temperatura de los gases de combustión. Generalmente no es viable esta técnica con un sistema de filtros de mangas, ya que la baja temperatura operativa, en el rango 180 – 200°C hace necesario recalentar el gas residual. El coste de calentamiento del gas a 400°C aproximadamente es prohibitivo desde el punto de vista económico, y supone un aumento del consumo energético de entre 5-10%, comparado con el input de energía del horno de fusión.

También es necesario niveles de polvo muy bajos (preferiblemente menores de 10 mg/Nm₃) y si el electrofiltro existente no es adecuado, será necesario mejorarlo o sustituirlo.

Independientemente de las limitaciones de su aplicabilidad, para la industria vidriera el factor predominante es el coste comparado con otras técnicas. La técnica SCR es una técnica relativamente cara si se compara con las medidas primarias. **No se considera de forma general por la industria vidriera, por tanto que esta técnica sea la más efectiva desde el punto de vista de coste, para la reducción de las emisiones de NOx.** No obstante, la evolución de los costes energéticos puede hacerla una técnica atractiva comparada con otras opciones (por ejemplo: reducción química por combustible o aplicaciones de oxicomustión cuando las concentraciones de entrada son muy elevadas).

Consideraciones económicas

El coste de la implantación de la técnica SCR depende principalmente del tamaño de la planta, a definir según los volúmenes residuales a tratar; así como 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 técnica SCR es un sistema de eliminación integrado en tres etapas, el coste de la técnica depende en gran medida de si el coste del precipitador electrostático 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 requerir equipo de eliminación de polvo; aunque en la mayoría de los casos este es un requisito esencial.

La información disponible sobre coste no siempre es fácil de interpretar y es específica de cada caso. La información disponible a fecha 2010 se resume a continuación:

Basados en la metodología *Netherlands Emissions Regulation* recogida en el documento *Best Available Techniques Reference Document for the Manufacture of Glass 2013* (punto 8.1), los datos de costes han sido estimados para diferentes tipos de producción y capacidades de horno. Los datos se basan en costes reales y valores calculados.

Los niveles de emisión asociados utilizados para estimar los costes relativos a la aplicación de la técnica SCR a hornos de fusión de vidrio, se sitúan entre 400 – 500 mg/Nm³ NOx.

Los datos de costes mostrados no incluyen los costes de inversión y operativos, relativos a la instalación de equipamientos de desulfuración y desempolvado requeridos previamente.

En el caso concreto del sector de vidrio hueco:

- El coste de inversión típico se sitúa entre 966.840 y 1.461.770 euros (valores actualizados año 2014*), dependiendo del tamaño del horno; el valor más alto corresponde a un horno de 450 toneladas/día; y el menor para un horno de capacidad 200 toneladas/día. Pueden ser necesarias inversiones adicionales para mejorar el sistema de tratamiento del gas residual (por ejemplo: concentraciones menores de partículas y SOx).
- Los costes operacionales se sitúan entre 86.325 –92.080 euros (valores actualizados año 2014*), para un horno de 200 toneladas/día de capacidad y superan los 136.000 euros al año para un horno de 450 toneladas/día.
- Los costes específicos por tonelada de vidrio fundido serían de entre 2,01 – 2,99 euros (valores actualizados año 2014*).

- Los costes específicos por kilo de NOx eliminado son superiores en comparación con los de hornos float, en el rango de 1,5 – 1,96 euros/kg NOx (valores actualizados año 2014*), dependiendo del tamaño de horno. Los costes específicos aumentan cuanto menor es la capacidad del horno.

*datos actualizados año 2014. Los datos recogidos en el documento de referencia son del año 2007. Se han actualizado considerando un IPC 2007-2014 del 15,1% (Fuente: INE, Instituto Nacional de Estadística).

Un ejemplo de costes asociados a la implantación de la técnica SCR:	SECTOR VIDRIO HUECO ⁽¹⁾
Combustible	Gas natural
Capacidad total de producción (toneladas/día)	640 t/d
Niveles de Emisión Asociados (AELs)	456 mg/Nm ³ 0,97 kg/t vidrio
Sistema de control de emisiones	SCR + precipitador + lavador gases con Ca(OH) ₂
Costes asociados ⁽²⁾	
Costes de inversión de SCR, incluye almacenamiento de amoniaco	2.350.000 euros
Costes de inversión para precipitador electrostático y lavado de gases	3.950.000 euros
Total costes de inversión	6.300.000 euros
Duración de la amortización	13 años
Costes de amortización anual para SCR + precipitador y lavado de gases	312.550 euros/año + 525.350 euros/año
Costes de inversión específicos para catalizador	2,00 euros/t vidrio
Costes por el suministros de amoniaco	106.000 euros/año
Costes de inversión por el sistema de control de emisiones	5,61 euros/t vidrio
<p>(1) Los costes incluyen accesorios, soplante, tuberías, almacenamiento de amoniaco, etc. (2) Los datos de costes son para el año de instalación del sistema de control de la contaminación y no son necesariamente representativos de costes actuales.</p>	

Fuente: Best Available Techniques Reference Document for the Manufacture of Glass 2013. Datos año 2007.

Si se realiza una comparativa de los costes de inversión totales entre los diferentes sectores de fabricación de vidrio (huevo, plano, especial,..), se puede comprobar que en el caso de vidrio huevo, estos costes son considerablemente superiores (6,3 millones en vidrio huevo frente a 5 y 4,3 millones en float y especial, valores año 2007).

Como información complementaria, se muestra los datos facilitados por una empresa proveedora de esta tecnología. Se adjunta información de las principales variables:

	Vidrio huevo
Combustible	Gas natural
Producción (toneladas/día)	350 t/d
Coste (euros)	1.000.000 € - 1.150.000 € + IVA
Agente reductor	NH ₃ (amoníaco)
Consumo de agente reductor (litros/hora)	180 l/h
Niveles de Emisión Asociados (AELs)	
Emisiones de NOx	
<i>Entrada, mg/Nm³, gas seco al 8% de O₂</i>	1.400 mg/Nm ³
<i>Salida, mg/Nm³, gas seco al 8% de O₂</i>	500 mg/Nm ³
Emisiones de NH₃	
<i>mg/Nm³, gas seco al 8% de O₂</i>	10 – 30 mg/Nm ³

Fuente: Elaboración propia (ANFEVI). Datos año 2014.

F. Reducción No Catalítica Selectiva (SNCR)

En el proceso de Reducción Catalítica No Selectiva SNCR, conocida también como DeNOx térmica, los óxidos de nitrógeno en los gases de combustión se reducen a nitrógeno mediante reacción a alta temperatura con amoníaco o urea. En la industria del vidrio sólo se utiliza amoníaco y amoníaco acuoso (es típica la solución al 25%). Las reacciones químicas involucradas son las mismas que las que tienen lugar con la técnica SCR. No obstante, las reacciones se producen a temperaturas más altas sin necesidad de catalizador. La temperatura operativa se encuentra en el rango 900 – 1.050 °C, pero la temperatura óptima es de alrededor de 950 °C para el caso del amoníaco y 1.000 °C para la urea.

En algunas aplicaciones se ha sugerido que la adición de hidrógeno al gas residual puede facilitar la reacción a temperaturas más bajas, pero se desconoce esta aplicación en la industria vidriera.

En la SNCR, el amoníaco se inyecta más cerca del horno que en el caso de SCR, y normalmente se utiliza un gas portador. La eficacia de la técnica depende de una serie de factores, siendo los principales:

- Temperatura
- Concentración inicial de NOx
- Mezcla uniforme del reactivo y de los gases de combustión
- Ratio NH₃ / NOx
- Tiempo de reacción (se requieren de 1 a 2 segundos) en un intervalo de temperatura 900 – 1.050 °C.

La técnica presenta los mismos problemas operativos potenciales que la SCR, es decir, desprendimiento de amoníaco, 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.

Debido a las dificultades encontradas para conseguir una mezcla uniforme entre el reactivo y los gases de combustión en el rango de temperaturas requerido, la aplicación de la técnica SNCR a hornos tipo regenerativos es muy limitada.

Beneficio ambiental

Para la técnica SNCR se indican reducciones normales de entre 40 – 70%, aunque en algunas aplicaciones fuera de la industria vidriera se han reportado cifras superiores al 80%.

Efectos cruzados

Las emisiones de amoníaco son uno de los principales factores limitantes de la eficacia de la técnica. Además de los requisitos legales en materia de transporte y almacenamiento, se deben adoptar medidas de seguridad para evitar la emisión de amoníaco y la exposición a emisiones fugitivas de NH₃ durante las operaciones de almacenamiento y antes de la inyección en la corriente de gases residuales. Estos asuntos en materia de seguridad también tienen impacto financiero.

También debe considerarse las emisiones indirectas asociadas al consumo de energía para electricidad (aire a presión, producción de amoníaco). El uso de energía necesario es de 1.700 kWh por tonelada de NOx reducida, mientras que la energía necesaria para producir amoníaco es de 10 kWh/ kg NH₃.

Datos operacionales

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. Pero en este caso, se deberían considerar los costes totales y los efectos cruzados, en particular por tonelada de NOx eliminada. 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.

Se muestra a continuación las principales ventajas y desventajas asociadas a la aplicación de la técnica SNCR:

VENTAJAS	DESVENTAJAS
<ul style="list-style-type: none"> ▪ La técnica 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. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ La inyección de amoníaco dentro del margen de temperatura correcto es esencial, aunque en ocasiones es difícil o impracticable de lograr (particularmente en hornos regenerativos) ▪ Se pueden producir emisiones de NH₃ o un aumento de las emisiones de NOx, si se trabaja fuera del rango de temperatura operativo. ▪ Es importante conseguir una mezcla uniforme, que puede ser difícil de conseguir. ▪ Se consume y se emite amoníaco, cuyo almacenamiento y manipulación plantea problemas medioambientales y de seguridad. ▪ Se pueden producir daños en el material refractario de los regeneradores.

Aplicabilidad

En principio, la técnica es aplicable a todos los procesos del vidrio, tanto en plantas nuevas como existentes. La SNCR supone menores costes de inversión y requiere menos espacio físico que la SCR, lo que puede hacer esta técnica más atractiva para proceso 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 técnica 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.

En general, **es más fácil implementar la técnica SNCR en hornos recuperativos que en hornos regenerativos**. En la práctica, **el uso de la SNCR en hornos regenerativos existentes es muy improbable**; ya que los costes y las dificultades asociadas llevan al operador a elegir un método alternativo para reducir las emisiones de NOx. En los hornos de recuperación pequeños, los costes relativos de la SNCR son bastante altos y en mucho caso, la industria se decanta por otras medidas de control más efectivas desde el punto de vista económico; en todo caso, dependerá del nivel de eficacia requerido.

En Europa en 2010, la técnica SNCR se ha aplicado en el sector de vidrios especiales. Aplicaciones anteriores en el sector de vidrio hueco (Alemania) y en vidrio plano (US) ya no están en operación.

Consideraciones económicas

En el sector de vidrio para envases, los costes de inversión típicos para hornos recuperativos con capacidades entre 200 y 350 toneladas/día están en el rango de 782.680 – 1.035.900 euros (valores actualizados año 2014*).

Los costes operacionales se han determinado en 85.174 euros anuales (valores actualizados año 2014*) para 200 toneladas/día en hornos recuperativos, y de más de 111.647 euros al año (valores actualizados año 2014*) para hornos de 350 toneladas/día.

Los costes específicos están entre 2,19 – 2,65 euros por toneladas de vidrio (valores actualizados año 2014*), siendo el valor mayor para hornos pequeños (200 t/día).

Los costes por kilo de NOx eliminado son de entre 2,42 y 2,88 euros/kg NOx (valores actualizados año 2014*), que son superiores a los de la técnica SCR debido a la menor eficacia de conversión del amoníaco en el proceso SNCR.

*datos actualizados año 2014. Los datos recogidos en el documento de referencia son del año 2007. Se han actualizado considerando un IPC 2007-2014 del 15,1% (Fuente: INE, Instituto Nacional de Estadística).

A destacar:

Las **técnicas de reducción de NOx más eficaces son las medidas primarias**, ya que están basadas en la adopción de medidas para evitar la formación de NOx y por lo tanto no producen efectos cruzados, como ocurre en el caso de técnicas secundarias, que tratan los efluentes gaseosos una vez se han producido.

Las medidas **implantadas en mayor medida** en el sector de fabricación de envases son las denominadas **medidas primarias básicas**, cuya adopción ha permitido reducir los niveles de emisión de NOx de 1.500 a 1.100 mg/Nm³.

Las **medidas primarias avanzadas** se plantean como la alternativa viable desde el punto de vista técnico-económico para alcanzar valores de emisión próximos a 800 mg/Nm³.

La **técnica SCR (Reducción Catalítica Selectiva) no parece actualmente una alternativa a considerar**, además de por su elevado coste, por los efectos adicionales generados: emisión de amoníaco, consumo de energía, producción de residuos de catalizador gastado,...

VI. Factores que influyen en los niveles de emisión de NOx

En el caso de los óxidos de nitrógeno, la selección de las MTDs depende en gran medida de los aspectos específicos de cada planta, en especial de la técnica de fusión utilizada y de la antigüedad del horno. Con algunas técnicas pueden obtenerse resultados distintos en las distintas aplicaciones y ocasionarse distintos costes según las condiciones específicas de la fábrica.

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 eficiencia energética de la operación de fusión.

El coste de la energía para la fusión en el horno es uno de los principales factores que influyen en los costes operativos de las instalaciones de fabricación de vidrio. El ahorro económico ha sido tradicionalmente la motivación para aplicar técnicas de ahorro energético, pero en los últimos años los aspectos ambientales han aumentado en importancia. En los hornos que utilizan combustibles fósiles, el consumo energético afecta asimismo las emisiones por tonelada de vidrio de las sustancias relacionadas directamente con la cantidad de combustible fósil, especialmente CO₂, SO₂ y NOx, aunque también partículas.

Técnica de Fusión y Diseño del Horno

La elección de la técnica de fusión tiene un gran efecto sobre la eficiencia 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 de inversión y operación asociados, a lo largo de la vida del horno. Una variable importante de los costes operativos, es el consumo energético; así que el fabricante elegirá el diseño más eficaz desde el punto de vista energético.

En hornos convencionales que utilizan combustibles fósiles, la principal diferencia en el diseño del horno, es el sistema de recuperación de calor; si se basa en regeneradores o en un sistema recuperador.

Los hornos regenerativos alcanzan una mayor temperatura de precalentamiento de los gases de combustión, de hasta 1.400°C frente a los 800°C en los hornos de recuperación, lo que produce mejores eficiencias de fusión. El tamaño generalmente superior de los hornos regenerativos hace también que sean más eficientes 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 horno regenerativo de vidrio para envases tiene una eficiencia térmica global de alrededor del 50%, con pérdidas de gases residuales en torno al 20%, y el resto está compuesto en su gran mayoría por pérdidas estructurales.

Los hornos regenerativos pueden ser de llama de bucle o de llama transversal. Los hornos de llama de bucle son más eficientes térmicamente (hasta un 10%), pero el control de combustión es más limitado y hay un límite superior al tamaño del horno (alrededor de 150 m² en vidrio para envases).

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.

Los hornos de fusión utilizados por las empresas asociadas a ANFEVI son regenerativos en todos los casos, de llama de bucle o llama transversal. Además, de la tecnología de fusión empleada, es necesario considerar la edad del horno, ya que la eficiencia energética y las emisiones empeoran a lo largo de la vida del horno.

Conviene destacar que el **horno de fusión de vidrio, durante su vida útil y hasta su reconstrucción, va perdiendo eficiencia energética a causa del envejecimiento**. Por ejemplo, un horno cuya vida útil media es de 10-12 años incrementa su consumo energético en 1-3% cada año. Esta misma tendencia se manifiesta en las emisiones de NOx, que aumentan a lo largo del ciclo de vida.

	Edad del horno	
	< 5 años	> 5 años
Emisiones de NOx	↓	↑
Consumo energético	↓	↑

La fusión combinada de combustibles fósiles y electricidad (apoyo eléctrico, boosting) es un método de agregar energía calorífica adicional al horno de vidrio, haciendo pasar una corriente eléctrica a través de electrodos situados en el fondo de la cuba. **Esta técnica mejora la eficiencia energética y reduce las emisiones de NOx.**

	Apoyo eléctrico (Boosting)	
	Con boosting	Sin boosting
Emisiones de NOx	↓	↑

Uso de casco de vidrio

El uso de casco (o calcín) en un horno de vidrio puede reducir significativamente el consumo de energía. La mayoría de sectores de la industria vidriera reciclan de forma rutinaria todo el vidrio de desecho interno. El nivel normal de vidrio de rechazo interno en la mezcla en el sector de vidrio hueco, es normalmente de un 10-25%.

El casco de vidrio consume menos energía de fusión que las materias primas vírgenes que lo componen, dado que las reacciones endotérmicas asociadas a 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 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.

Es necesario diferenciar entre casco 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 definida, lo que limita su aplicación. Unos elevados requisitos de calidad del producto final pueden restringir la cantidad de casco externo que puede utilizar el fabricante.

El uso de casco de vidrio externo está limitado debido a los requerimientos de los productos finales. Por ejemplo, el color de vidrio fabricado limita el uso de casco externo, ya que en el caso de fabricar vidrio de color blanco, solamente se puede introducir al horno, casco del mismo color, que en la mayoría de los casos corresponde a rechazos internos de la propia planta.

En función del tipo de producto fabricado, la introducción de la separación por colores en el sistema de recogida y tratamiento (no disponible en España) permitiría disponer de casco de vidrio por colores en función de las necesidades de producción, lo que contribuiría a la disminución de la cantidad de colorante en masa necesaria para obtener el color final y, en el caso del vidrio blanco a aumentar la cantidad de casco disponible (al no estar mezclado con vidrio de color).

Como se muestra en la tabla adjunta, la fabricación de vidrio de color permite la introducción de mayor cantidad de casco en el horno, en sustitución de materias primas vírgenes, lo que mejora la eficiencia energética y reduce las emisiones de NOx.

	Tipo de vidrio fabricado	
	Color	Blanco
Cantidad de casco introducida en el horno	↑	↓
Emisiones de NOx	↓	↑
Consumo energético	↓	↑

Adicionalmente, el uso de casco en la producción de vidrio para envases varía desde < 20% a > 90%, con una media en la UE en torno al 48%. No obstante, los índices de reciclaje varían ampliamente entre los Estados Miembros según los programas existentes para la recogida de vidrio de consumo.

Control de combustión y elección de combustible

La combustión de gas natural produce menores emisiones de SOx, aunque generalmente origina mayores emisiones de NOx. Esto es debido a que la llama de gas natural es menos radiante y generalmente da lugar a mayor consumo de energía, aproximadamente un 7-8% superior.

	Combustible	
	Gas natural	Fuel oil
Emisiones de NOx	↑	↓
Emisiones de SOx	↓	↑

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 NOx han producido asimismo ahorro 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 las emisiones de NOx, han llevado en muchos casos a mejoras en el funcionamiento y la eficiencia de los hornos.

No obstante, es necesario insistir en que la **elección del tipo de combustible viene condicionada por la jerarquía de prioridades que impone cada Estado Miembro en función de sus políticas energéticas**, que obedecen a intereses macroeconómicos, a compromisos y relaciones internacionales o a estrategias a largo plazo. Hay que señalar que en algunas regiones del sur de Europa en las que está prohibido el uso del fuel oil en la industria vidriera.

Teniendo en cuenta este contexto, la industria vidriera en España, junto con el MAGRAMA propuso en febrero de 2010 (en el documento *Spanish Position on the Review of the GLS BREF*) una serie de comentarios a los Split Views, donde se incide en que la única fórmula para asociar niveles de emisión comparables es que se refieran a unas **condiciones estándar teóricas**. Por tanto, las **emisiones deben ser corregidas** (también debería tener en cuenta un aspecto muy importante, que es la forma de obtener el dato) **a un combustible tipo, con unas características tipo y descontando los efectos del empleo del casco**.

Estos sistemas de corrección deben llevar un estudio riguroso que podría extenderse en el tiempo, por lo que se plantea como una alternativa utilizar una **fórmula en que se fijen niveles de emisión en función del combustible empleado**. Esta fórmula se emplea en el caso de los derivados de azufre (SO₂), por lo que dotaría de coherencia interna los documentos: BREF, así como BAT Conclusions; y de esta forma se eliminaría la discriminación que se da a favor de la industria que emplea fuel oil frente a la emplea gas natural, sin ninguna justificación medioambiental y sin margen de maniobra para las empresas afectadas.

En concreto, se planteaba para el sector de envases de vidrio, los siguientes valores:

	Niveles de emisión de NOx (al 8% de O ₂)	
	Fuel-oil	Gas natural
Medidas primarias	500 - 800	950 - 1150
Medidas secundarias	< 500	< 700*

*La reducción es porcentual, dependiendo por tanto de partida, y además por debajo de este valor de 700 mg/Nm³ podrían comenzar los problemas con Nh₃ dando lugar a un balance medioambiental negativo.

Esta situación puede comprobarse con los datos relativos a empleo de los diferentes combustibles en España y en Europa:

	España	Europa
Gas natural	85%	63%
Fuel	7%	19%
Electricidad	8%	18%

A destacar:

La fabricación de vidrio es un proceso con un consumo intensivo de energía y las opciones elegidas de **fuerza de energía, técnica de calentamiento y método de recuperación de calor** son básicas, tanto en el **diseño del horno** como en la **rentabilidad** económica del proceso. Estos factores además, influyen directamente en el **comportamiento medioambiental** y la **eficiencia energética** de la operación de fusión.

En cuanto a las **emisiones de NOx**, los factores que están relacionados directamente con su generación son: **técnica de fusión (tipo de horno, edad, boosting-apoyo eléctrico, uso de casco, control de combustión y elección de combustible)**. Algunos de estos aspectos, como la **disponibilidad de casco o la elección del combustible (gas natural)** no son decisión de las empresas **vidrieras**, sino que vienen fijados por las políticas ambientales y energéticas del país.

VII. Mejores Técnicas Disponibles para la fabricación de envases de vidrio relativas a la emisión de óxidos de nitrógeno

La Decisión de ejecución de la Comisión de 28 de febrero de 2012, por la que se establecen las conclusiones sobre las mejores técnicas disponibles (MTD) en la fabricación de vidrio conforme a la Directiva 2010/75/UE del Parlamento Europeo y del Consejo sobre las emisiones industriales, publicado en 8 de marzo de 2012 en el Diario Oficial de la Unión Europea, presenta las conclusiones sobre las MTD en las actividades de fabricación de vidrio para envases.

La Mejor Técnica Disponible consiste en reducir las emisiones de NOx del horno de fusión aplicando al menos una de las técnicas siguientes enumeradas, siguiendo estrictamente el orden recogido en el documento mencionado en el párrafo anterior:

Técnicas primarias	Modificaciones de la combustión (MC): <i>a. Reducción de la relación aire/combustible (MC_A)</i> <i>b. Temperatura del aire de combustión reducida (MC_B)</i> <i>c. Combustión por fases (MC_C)</i> <i>d. Recirculación de los gases de salida (MC_D)</i> <i>e. Quemadores de bajo NOx (MC_E)</i> <i>f. Elección del combustible (MC_F)</i>
	Hornos de diseño especial (DE)
	Fusión con oxicombustión (FO)
Técnicas secundarias	Reducción Catalítica Selectiva (SCR)
	Reducción Catalítica No Selectiva (SNCR)

Técnicas Primarias, como por ejemplo:

Modificaciones de la combustión (MC)

a. Reducción de la relación aire/combustible (MC_A)

La técnica se base principalmente en los siguientes aspectos:

- Minimización de las entradas de aire hacia el interior del horno.
- Control exhaustivo del aire utilizado para la combustión.
- Modificación del diseño de la cámara de combustión del horno.

b. Temperatura del aire de combustión reducida (MC_B)

La utilización de hornos de recuperación en lugar de hornos regenerativos provoca una reducción de la temperatura de precalentamiento del aire, y en consecuencia, una menor temperatura de llama. No obstante, esto se asocia a una menor eficiencia del horno (menor tirada específica), una menor eficiencia en la utilización del combustible, así como un mayor consumo del mismo, lo cual puede provocar un nivel de emisiones más elevado (kg/tonelada de vidrio).

c. Combustión por fases (MC_C)

- Introducción del aire por fases: implica la ignición subestequiométrica y la introducción del oxígeno o aire restante en el horno para una combustión completa.
- Introducción del combustible por fases: se desarrolla una llama primaria de bajo impulso en el conducto del quemador (10% de la energía total); una llama secundaria cubre la base de la llama primaria, reduciendo la temperatura del núcleo.

d. Recirculación de los gases de salida (MC_D)

Implica la reinyección del gas residual desde el horno a la llama para reducir el contenido de oxígeno y, por consiguiente, la temperatura de la llama.

La utilización de quemadores especiales se basa en la recirculación interna de los gases de combustión, que enfría la base de las llamas y reduce el contenido de oxígeno en la parte más caliente de las llamas.

e. Quemadores de bajo NOx (MC_E)

La técnica se basa en los principios de reducción de las temperaturas de punta de las llamas, la finalización, aunque retrasada, de la combustión y el aumento de la transferencia térmica (mayor emisividad de la llama). Puede ir asociada a una modificación de diseño de la cámara de combustión del horno.

f. Elección del combustible (MC_F)

Por lo general, los hornos alimentados con fuel oil registran unas emisiones de NOx inferiores respecto a los hornos de gas debido a una menor emisividad térmica y a unas temperaturas de llama inferiores.

Horno de diseño especial (DE)

Hornos regenerativos puede ser modificado, con la introducción de **medidas primarias avanzadas** con el objetivo de reducir las emisiones. En general, los parámetros más importantes de diseño del horno, con respecto a la formación de NOx son:

- Tipo de horno
- Número de quemadores en operación
- Ángulo de quemadores
- Ángulo del pórtico del quemador
- Tamaño del pórtico del quemador (que determina la velocidad del aire de entrada en la cámara de combustión)
- Distancia entre quemador/pórtico del quemador
- Altura y tamaño de las cámaras de combustión (en general, tamaños mayores están asociadas a menores emisiones de NOx y ligeramente incrementado el consumo energético del horno)
- Geometría de llama en relación con la cámara de combustión.

Hornos recuperativos que integran diversas funciones, permitiendo la reducción de las temperaturas de las llamas. Sus principales características son:

- Tipo específico de quemadores (número y colocación)
- Geometría del horno modificada (altura y tamaño)
- Precalentamiento de las materias primas en dos fases, en el que los gases residuales pasan por la materia prima que entra en el horno y se utiliza un precalentador del casco de vidrio externo, posterior al recuperador utilizado para el precalentamiento del aire de combustión

Fusión con oxicomustión (FO)

La técnica implica la sustitución del aire de combustión por oxígeno (pureza > 90%), con la consecuente eliminación/reducción de la formación térmica de NOx a partir de nitrógeno que entra en el horno. El contenido residual de nitrógeno en el horno depende de la pureza del oxígeno suministrado, de la calidad del combustible (% de N2 en el gas natural) y de la posible entrada de aire.

Técnicas Secundarias, como por ejemplo:

Reducción Catalítica Selectiva (SCR)

La técnica se basa en la reducción del NOx a nitrógeno en una capa catalizadora mediante una reacción con amoníaco (en una solución acuosa general) a una temperatura de operación óptima de alrededor de 300 – 450 °C.

Se puede aplicar una o dos capas catalizadoras. Se obtiene una mayor reducción de NOx utilizando una mayor cantidad de catalizador (dos capas).

Reducción No Catalítica Selectiva (SNCR)

La técnica se basa en la reducción de NOx a nitrógeno mediante la reacción con amoniaco o urea a altas temperaturas.

Deberá mantenerse un margen de temperatura de operación de entre 900 y 1.050 °C.

Los Niveles de Emisión Asociados a las MTD (NEA-MTD) también conocidos por sus siglas en ingles BAT-AELs, para las emisiones de NOx del horno de fusión:

	MTD	NEA-MTD	
		mg/Nm ³	Kg/tonelada vidrio fundido ⁽¹⁾
NOx expresados como NO₂	Modificaciones de la combustión, hornos de diseño especial ⁽²⁾ ⁽³⁾	500-800	0,75-1,2
	Fusión con oxicomustión ⁽⁴⁾	No procede	<0,5-0,8
	Técnicas secundarias	< 500	<0,75

(1) Se ha aplicado el factor de conversión para casos generales $1,5 \times 10^{-3}$, excepto para la fusión eléctrica (casos específicos 3×10^{-3}).

(2) El valor inferior se refiere a la utilización de hornos de diseño especial, cuando sea aplicable.

(3) Estos valores deberán reevaluarse en caso de reconstrucción normal o completa del horno de fusión.

(4) Los niveles que se pueden alcanzar dependen de la calidad del gas natural y del oxígeno disponibles (contenido de nitrógeno).

Los Niveles de Emisión Asociados a las Mejores Técnicas Disponibles (NEA-MTD) se aplican para las siguientes condiciones de referencia:

	Unidad	Condiciones de referencia
Hornos de fusión convencional en fundiciones continuas	mg/Nm ³	8% de oxígeno en volumen

Todos los valores relativos a las concentraciones en los gases residuales se refieren a las condiciones normales: gas seco, temperatura 273,15 K, presión 101,3 kPa.

Para mediciones discontinuas	Los NEA-MTD se refieren al valor medio de tres muestras puntuales, de un mínimo de 30 minutos cada una; para los hornos regenerativos, el periodo de medición deberá abarcar como mínimo dos inversiones de ignición de las cámaras regeneradoras.
Para mediciones continuas	Los NEA-MTD se refieren a los valores medios diarios.

VIII. *Implantación de las Mejores Técnicas Disponibles a nivel nacional*

A continuación se muestra el análisis realizado en las empresas de ANFEVI en cuanto a la implantación de medidas primarias (reconocidas como Mejor Técnicas Disponibles) para la reducción de las emisiones de NOx.

Se ha analizado el grado de implantación para el periodo 2010-2013, tanto de las medidas específicas para la reducción de NOx, como de las medidas de carácter general, relacionadas con la eficiencia energética, el uso de materias primas, y las emisiones de CO.

TÉCNICAS ESPECÍFICAS NOx	APLICABILIDAD	IMPLANTACIÓN EN EL SECTOR DE VIDRIO HUECO
<p>Modificaciones de la combustión a) Reducción de la relación aire/combustible</p>	<p>Aplicable a hornos de combustible-aire convencionales. Se aprovechan todas sus ventajas con una reconstrucción tanto normal como completa del horno, si se combinan con una geometría y diseño óptimos del horno.</p>	<p>100%</p>
<p>Modificaciones de la combustión e) Quemadores de bajo NOx</p>	<p>La técnica es de aplicación general. Los beneficios suelen ser menores en las aplicaciones en <u>hornos de gas de llama transversal</u> debido a las limitaciones técnicas y a que el grado de flexibilidad del horno es menor. Se aprovechan todas sus ventajas con una reconstrucción tanto normal como completa del horno, si se combinan con una geometría y diseño óptimos del horno.</p>	<p>83 - 92%</p>
<p>Modificaciones de la combustión f) Elección del combustible</p>	<p>La fusión combinada por medio de combustibles fósiles y electricidad. El refuerzo eléctrico (boosting) es un método de generar calor adicional en el horno haciendo pasar una corriente eléctrica por los electrodos situados en el fondo de la cuba. El boosting se utiliza además para mejorar el comportamiento medioambiental del horno, sustituyendo la combustión por el calentamiento eléctrico, y reduciendo por tanto los niveles de emisiones atmosféricas emitidos.</p>	<p>81% (Disponible y se utiliza) 8% (Disponible y no se utiliza) Se trata en este punto de apoyo eléctrico (boosting) adicional al empleo de combustible convencional (gas y fuel).</p>
<p>Horno de diseño especial</p>	<p>La preocupación por las emisiones de NOx ha llevado a algunos diseñadores a proponer hornos que integran diversas características previstas para permitir menores temperaturas de llama y con ello menores niveles de NOx. Se debe considerar la introducción de estas medidas en la etapa de diseño del horno.</p>	<p>Implantación progresiva (Se consideran en el diseño de los nuevos hornos)</p>

TÉCNICAS GENERALES	APLICABILIDAD	IMPLANTACIÓN EN EL SECTOR DE VIDRIO HUECO
Reducir el consumo de energía y las emisiones a la atmósfera		
<p>La técnica consiste en una serie de operaciones de vigilancia y mantenimiento que pueden aplicarse de forma individual o combinadas en función del tipo de horno y con el objeto de minimizar los efectos de envejecimiento del mismo, por ejemplo: sellar el horno y los bloques del quemador, mantener el máximo nivel de aislamiento, controlar las condiciones de llama estabilizada, controlar la relación combustible/aire, etc.</p>	<p>Aplicable a hornos regenerativos, de recuperación y de oxidación</p>	<p>100%</p>
Selección cuidadosa y control de todas las sustancias y materias primas que entren en el horno de fusión para reducir o limitar las emisiones a la atmósfera aplicando las siguientes técnicas		
<p>i. Utilización de materias primas y casco de vidrio externo con un bajo nivel de impurezas</p>	<p>Aplicabilidad dentro de los límites correspondientes al tipo de vidrio producido en las instalaciones y en función de la disponibilidad de materias primas y combustibles.</p>	<p>100%</p>
Limitar las emisiones de CO del horno de fusión, cuando se apliquen técnicas primarias o reducción química mediante combustible, para la reducción de las emisiones de NOx		
<p>Las técnicas primarias para la reducción de las emisiones de NOx se basan en las modificaciones de las combustión (por ejemplo, reducción de la relación aire/combustible, quemadores de combustión por fases con bajo nivel de NOx, etc.). La reducción química mediante combustible consiste en añadir combustible hidrocarbonado a la corriente de gases residuales para reducir el NOx formado en el horno. Es posible limitar el aumento de las emisiones de CO derivado de la aplicación de estas técnicas por medio de un control exhaustivo de los parámetros de operación.</p>	<p>Aplicable a hornos de combustión combustible-aire convencionales</p>	<p>100%</p>

En concreto, para cada una de ellas, se ha optado por las siguientes actuaciones:

MEDIDAS PRIMARIAS IMPLANTADAS (2010-2013)	
Modificaciones de la combustión	Reducción de la relación aire/combustible
	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Minimización de la entrada de aire parásito al horno. ▪ Control en continuo el porcentaje de O₂ con sondas, adaptando el ratio aire/combustible en auto para evitar variaciones en la aportación del aire de combustión, que modifiquen la combustión y por tanto, las emisiones (CO y NOx). ▪ Monitorizar los niveles de NO, CO y O₂ y de los gases de combustión. ▪ Reducir la relación aire/combustible a niveles próximos al estequiométricos, de forma que también se mejore la eficiencia energética. No obstante, para asegurar la calidad del vidrio es necesario trabajar con un ligero exceso de aire, dependiendo del color del vidrio. Por otro lado, si se utiliza una combustión próxima a la estequiométrica, los niveles de CO tienden a aumentar, aumenta de deterioro del material refractario y se altera el nivel redox de vidrio, afectando a su calidad. ▪ Control del aire utilizado para la combustión.
	Quemadores de bajo NOx
	<p>Se están utilizando quemadores con flujo de gas independiente por el interior y por el exterior, y con control independiente del caudal por quemador.</p> <p>En algunos casos se utiliza menor número de quemadores, así como posicionamiento diferente de los ángulos de quemadores, lo que va en contra de la calidad y los consumos.</p> <p>Se ha utilizado alguna tecnología que utiliza mayor cantidad de quemadores por pórtico. Estos quemadores llevan aire a presión diluido con el gas al entrar dentro de la cámara de combustión del horno por lo que hay reducción del flujo de aire. La reducción de NOx se consigue a base de niveles elevados de CO.</p> <p>Se está trabajando también en el posicionamiento trasero de quemadores simultáneos, que permite reducir la temperatura de pico de llama, retrasando que se complete la combustión y aumentado la transferencia de calor (se aumenta la emisividad de llama). Puede ir asociado a un diseño modificado de la cámara de combustión del horno.</p>
	Elección del combustible (Refuerzo eléctrico - Boosting)
	<p>Se trata en este punto de refuerzo eléctrico (boosting) adicional al empleo de combustible convencional (gas y fuel). Se consigue que la temperatura de llama sea menor y por lo tanto se reducen las emisiones de NOx. Se puede instalar con el horno de fusión en funcionamiento pero es necesario haberlo contemplado con anterioridad en la fase de diseño del horno, ya que requiere un tipo específico de material refractario.</p>

MEDIDAS PRIMARIAS IMPLANTADAS (2010-2013)**Diseños especiales de hornos**

Hornos que integran diferentes características que permiten conseguir menores temperaturas de llama y en consecuencia, menores niveles de emisión de NOx. Entre las medidas:

- Tipo de horno
- Número de quemadores en operación
- Ángulo de quemadores
- Ángulo del pórtico del quemador
- Tamaño del pórtico del quemador (que determina la velocidad del aire de entrada en la cámara de combustión)
- Distancia entre quemador/pórtico del quemador
- Altura y tamaño de las cámaras de combustión (en general, tamaños mayores están asociadas a menores emisiones de NOx y ligeramente incrementado el consumo energético del horno)
- Geometría de llama en relación con la cámara de combustión.

En cuanto a las medidas de carácter general:

Reducir el consumo de energía y las emisiones a la atmósfera

Las empresas disponen de Planes de vigilancia y mantenimiento preventivo asociado a la búsqueda del mínimo consumo. Se busca la estabilidad en la combustión y en la calidad del vidrio, pues esto permite reducir los rangos de control.

Además, se establecen Planes de limpieza de quemadores, cámaras, conductos, etc., que permitan optimizar la combustión.

Selección cuidadosa y control de todas las sustancias y materias primas que entren en el horno de fusión para reducir o limitar las emisiones a la atmósfera aplicando las siguientes técnicas

En este aspecto, las empresas solamente consideran el aumento en el consumo de casco como materia prima.

Limitar las emisiones de CO del horno de fusión, cuando se apliquen técnicas primarias o reducción química mediante combustible, para la reducción de las emisiones de NOx

Se realizan controles de ratios en automático de las sondas de O₂ y con técnicas de introducción de aire que postcombustione el CO como ventiladores en port-neck o ggNO_x.

En otros casos, se modifica la relación aire/combustible y se controlan exhaustivamente los parámetros de operación.

IX. Análisis de escenarios

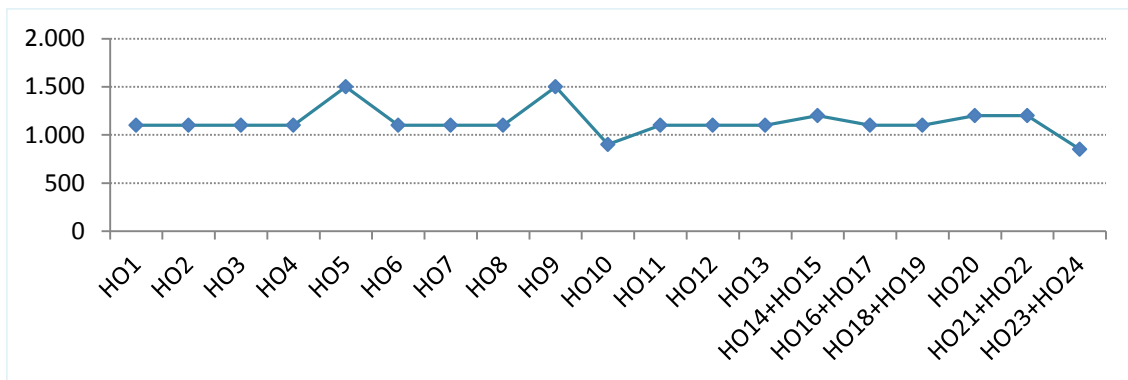
Escenario 0 (Línea Base)

Llegados a este punto, se trata de establecer la línea de base para el estudio (denominada Escenario 0), partiendo de los niveles de emisión actuales, de acuerdo a los límites de emisión a la atmósfera fijados en las Autorizaciones Ambientales Integradas (AAI) vigentes en las instalaciones.

El trabajo que se ha llevado a cabo a nivel sectorial durante los años 2010 a 2013 ha permitido recopilar, información tanto sobre las obligaciones recogidas en las Resoluciones de AAI relativas a las emisiones atmosféricas como sobre los niveles de emisión asociados a cada horno.

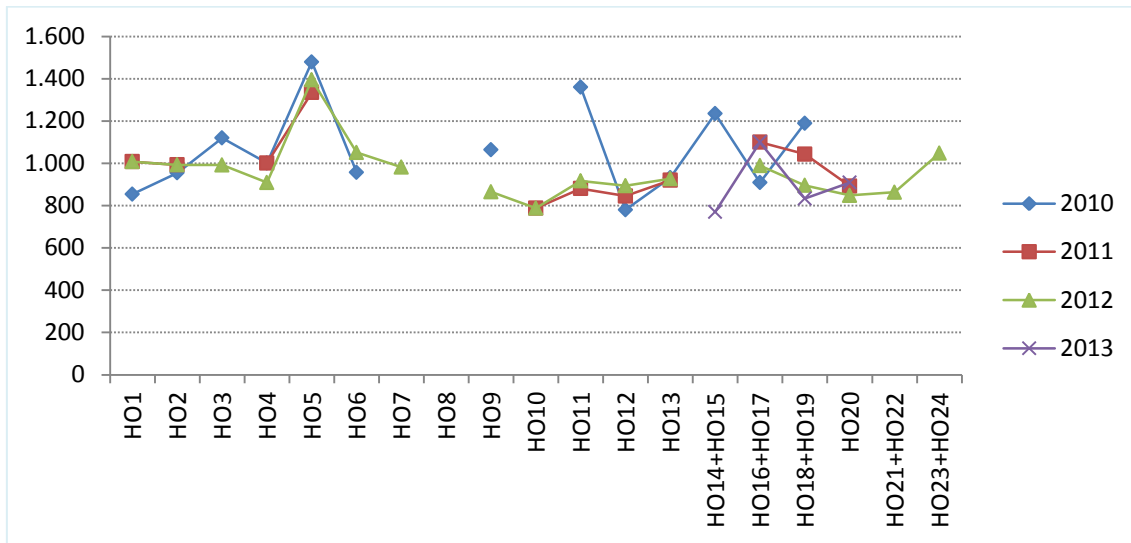
En lo que a emisiones atmosféricas de NOx asociadas al proceso de fusión se refiere, los VLE (Valores Límites de Emisión) recogidos en las AAI de las 13 plantas pertenecientes a ANFEVI oscila entre 800 y 1.500 mg/Nm³.

En algunos casos, a un horno le corresponde un conducto de salida (identificado con H01, H02,..) y en otros casos, se conduce la salida de dos hornos a una misma chimenea (identificado con H014+H015, H016+H017,...), que en muchos casos cuenta con un sistema de tratamiento de emisiones (electrofiltro) para reducir las emisiones de partículas.



Valores Límites de Emisión de NOx aplicables. Fuente: ANFEVI

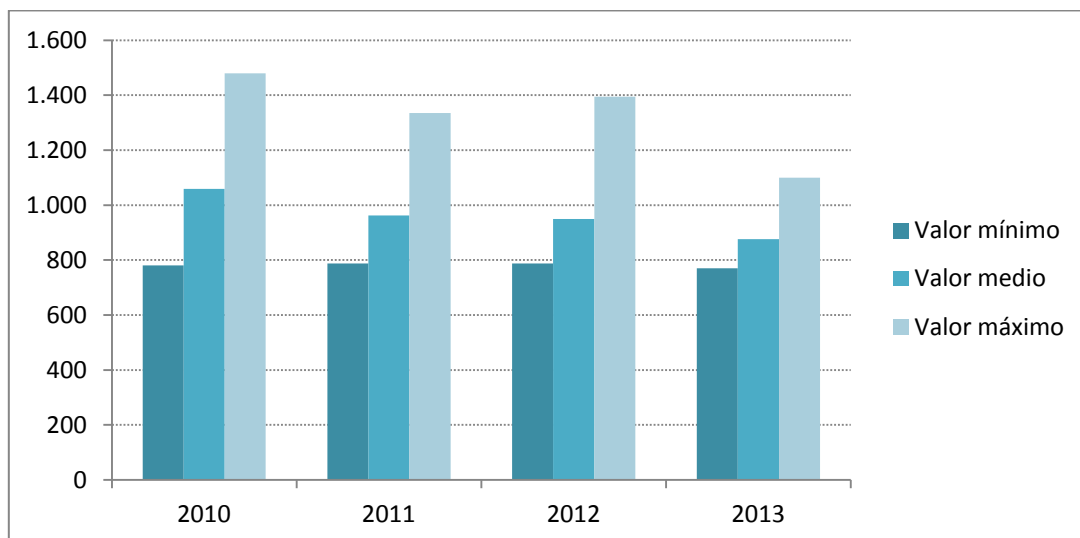
Los niveles de emisión de NOx en las distintas plantas para el periodo 2010 – 2013 son:



Nivele de Emisión de NOx periodo 2010-2013. Fuente: ANFEVI

Del análisis de los datos recogidos en el gráfico, se puede establecer para los niveles medios de emisión de NOx para el periodo 2010-2013 los siguientes valores:

- Valor máximo 2010-2013: 1.100 - 1.480 mg/Nm³
- Valor medio 2010-2013: 880 – 1.060 mg/Nm³
- Valor mínimo 2010-2013: 770 - 790 mg/Nm³



Escenario 1

Este escenario es el que plantean las empresas de ANFEVI a partir de 2014, y teniendo en cuenta el horizonte (febrero 2016) en la que será de aplicación los Valores Límite de Emisión recogidos en el documento de Conclusiones BATs del sector de fabricación de vidrio.

El sector plantea mantener la trayectoria seguida en años anteriores y apostar firmemente por la adopción de medidas primarias para la reducción de las emisiones de NOx, considerando que con éstas se consigue menor impacto ambiental global que con las técnicas de fin de línea (tipo SCR, SNCR,...). Además estas técnicas de prevención tienen potencial para ahorro de energía y en consecuencia, reducción en la emisión de otros contaminantes, como por ejemplo: CO₂.

En concreto, se propone optar por la implantación de medidas primarias avanzadas, que implican en muchos casos modificaciones de diseño del horno. Para llevarlas a cabo, en la mayoría de los casos es necesario esperar a las reconstrucciones parciales o totales de los hornos de fusión. Se detallan algunas de ellas:

- Sellado de cámaras
- Sellado de bóvedas
- Quemadores regulables/graduables
- Combustión independiente con separación de caudal interno y externo
- Cargadoras cerradas
- Adaptaciones de diseño del horno, en particular:
 - incrementar la altura y tamaño de las cámaras de combustión,
 - alargar el tamaño de los pórticos de quemadores,
 - cambio de la inclinación (ángulo) de los pórticos y la posición de los quemadores.
- Boosting barrera

De este modo, los niveles de emisión a alcanzar se sitúan en 800 mg/Nm³, que son los valores que se recogen en el documento de Conclusiones BAT para el sector de vidrio para envases.

Escenario 2

Esta alternativa supone la implantación de una medida secundaria para el tratamiento de las emisiones de NOx. Se trata por tanto de una tecnología fin de línea, que trata de reducir las emisiones ya generadas, a diferencia de las medidas primarias, que tratan de prevenir la generación de las mismas.

Aspectos relevantes de impacto ambiental

Se trata en este punto de evaluar los tres escenarios en relación a consideraciones técnicas, económicas y medioambientales. Para comprobar el efecto que cada escenario logra en relación con el medio ambiente, proponemos considerar los siguientes parámetros de evaluación:

- Emisiones a la atmósfera (NO_x, NH₃, etc.)
- Inmisión en zonas sensibles
- Consumo de materias primas
- Consumo de energía
- Generación de residuos
- Riesgos de accidentes

Impacto ambiental	Escenario 0 Medidas primarias básicas	Escenario 1 Medidas primarias avanzadas	Escenario 2 Medidas secundarias (SCR)	Justificación
Consumo de energía	+	+	++	Para el Escenario 2, el uso de electricidad (necesidad de mayor capacidad de aspiración y aire presurizado para la limpieza de los módulos de catalizador; y para atomizar la solución de amoníaco en los gases) y el consumo de amoníaco están asociados con las emisiones indirectas (NOx y CO ₂) relativas a su producción.
Consumo de NH ₃	-	-	+	Con la técnica SCR se el consumo de energía adicional es de 3,20 kWh/t vidrio, y un consumo de NH ₃ de 0,57 kg/t vidrio. Por el contrario, las medidas primarias pueden producir a menudo un ahorro significativo de energía.
Emisión de NOx	+++	++	+	Los niveles de emisión de NOx asociados a cada escenario son: <ul style="list-style-type: none"> - Escenario 0: entre 1.100 y 1.400 mg/Nm³ - Escenario 1: entre 700 y 800 mg/Nm³ - Escenario 2: entre 400 y 500 mg/Nm³ Además, los niveles de reducción de NOx alcanzables son: <ul style="list-style-type: none"> - Escenario 1: 1.023 g/t vidrio - Escenario 2: 1.452 g/t vidrio
Emisión de NH ₃	-	-	+	Los niveles de emisión de NH ₃ asociados a la utilización de la tecnología SCR (Escenario 2) se sitúan entre 10 y 30 mg/Nm ³ . Para los escenarios 0 y 1, no se producen emisiones de amoníaco.
Emisiones de SOx (indirectas)	-	-	+	Con el empleo de la tecnología SCR (escenario 2) se producen emisiones indirectas de SOx, de 23 g/t vidrio. Para los escenarios 0 y 1, no se producen emisiones de SOx.
Emisiones de CO ₂ (directas e indirectas)	+	+	++	En el caso del Escenario 2 (SCR), las emisiones extra de CO ₂ (tanto directas como indirectas) se sitúan en 3 kg/t vidrio.

Impacto ambiental	Escenario 0 Medidas primarias básicas	Escenario 1 Medidas primarias avanzadas	Escenario 2 Medidas secundarias (SCR)	Justificación
Riesgo de accidentes por almacenamiento y transporte de NH ₃	-	-	+	Para la tecnología SCR, el uso de amoníaco está asociado no solamente con la emisión de la solución que no ha reaccionado sino también con los requisitos legales en materia de seguridad y medio ambiente para transporte, almacenamiento y uso de amoníaco (Directiva accidentes graves).
Residuos de catalizador gastado	-	-	+	Se generan residuos del catalizador (utilizado en la tecnología SCR) cuando éste tiene que ser renovado al finalizar su vida útil. La vida del catalizador puede ser de 4-5 años.

- Sin impacto + menor impacto ++ impacto medio +++ mayor impacto

X. Costes económicos

En esta fase del estudio se ha recopilado y calculado los datos económicos de cada escenario, particularmente los relativos a las medidas secundarias por ser los que más incidencia presentan. Para cada una de las medidas de reducción planteadas, se ha elaborado una tabla con sus principales indicadores económicos para la posterior comparación en términos de coste-eficacia:

<i>Capacidad horno (t/d)</i>	<i>Inversión requerida (€)</i>	<i>Costes de capital anualizados (€)</i>	<i>Costes de operación anuales (€)</i>	<i>Coste anual equivalente (€)</i>
Medidas primarias básicas				
Nivel emisión NOx: 1.100 – 1.400 mg/Nm ³				
200 t/d Gas, bucle	265.000	35.900	27.600	63.500
300 t/d Gas, bucle	328.000	44.500	29.900	74.400
450 t/d Gas, bucle 1.050 – 1.100 mg/Nm ³ NOx	380.000	51.600	36.300	87.900
450 t/d Gas, transversal	806.000	109.300	83.500	192.800
Medidas primarias avanzadas				
Nivel emisión NOx: 750 – 800 mg/Nm ³				
200 t/d 750 mg/Nm ³ NOx	806.000	109.500	27.600	137.100
300 t/d	1.019.000	138.400	29.900	168.300
450 t/d	1.243.000	169.200	36.300	205.500

Capacidad horno (t/d)	Inversión requerida (€)	Costes de capital anualizados (€)	Costes de operación anuales (€)	Coste anual equivalente (€)
SCR (Reducción Catalítica Selectiva) Nivel emisión NOx: 400 – 500 mg/Nm ³				
200 t/d	967.000	126.600	89.200	215.800
300 t/d	1.192.000	155.000	113.700	268.700
450 t/d	1.462.000	191.400	156.000	347.400

Fuente: *Best Available Techniques Reference Document for the Manufacture of Glass 2013*.

Datos actualizados 2014. Los datos recogidos en el documento de referencia son del año 2007. Se han actualizado considerando un IPC 2007-2014 del 15,1% (Fuente: INE, Instituto Nacional de Estadística).

Los datos mostrados se han tomado del análisis económico incluido en el documento *Best Available Techniques Reference Document for the Manufacture of Glass 2013* en su apartado 8, anexo I: *Method of estimation of air pollution control costs and cross-media effects*. La metodología utilizada para el cálculo de los datos es el método NER (Netherlands Emissions Regulation).

Los costes de capital incluyen la inversión requerida en nuevos equipos o en cambios/modificaciones de las instalaciones existentes. Los costes se prorratean a lo largo de la vida útil y se calculan como gastos de capital por año (costes de capital anualizados). Los costes incluyen la depreciación anual de la inversión además de los intereses anuales. Los costes de inversión incluyen:

- Equipamiento SCR, nuevos quemadores, cambios en el diseño del horno.
- Piping, conexiones a los sistemas de gases de escape, sistemas de impulsión adicionales o aumento de la capacidad para compensar la pérdida de presión de los gases de escape en los equipos de tratamiento (filtros, SCR,...), silos de almacenamiento y transporte de residuos,...
- Ingeniería y construcción del equipamiento “on site”.
- Transporte del nuevo equipamiento.

- Preparación del lugar: cimentación, edificios.
- Suministro de electricidad, centros de transformación.
- Cambios en el tiro de chimenea o construcción de una nueva.
- Costes de la licencia (generalmente se incluye en el precio del equipamiento principal).
- Sistema de monitorización en continuo para la composición de los gases de escape (NOx, SOx, O₂, polvo), necesario para el control del funcionamiento del sistema de tratamiento de emisiones y para detectar posibles fallos (tal y como el envenenamiento del catalizador, módulos defectuosos del filtro de mangas).

Algunas consideraciones adicionales para el cálculo anualizado de los costes de capital:

- El interés que se aplica a las inversiones se ha fijado en un 6% anual.
- El periodo de amortización considerado es de 10 años, teniendo en cuenta la vida útil de los equipos de tratamiento de emisiones atmosféricas así como el periodo de amortización económico para este tipo de instalaciones.
- Para edificios, cimentación e infraestructuras, el periodo de depreciación se considera 25 años.

Los costes de operación incluyen:

- Consumo extra de energía.
- Consumo de productos químicos, por ejemplo amoniaco (o urea),...
- Combustible adicional, por ejemplo para compensar la pérdida de eficiencia energética en algunos casos.
- Mano de obra asociada al mantenimiento y operación del equipamiento.
- Calibración periódica de los equipos de monitorización.
- Uso del agua para la preparación de la solución de amoniaco.
- Reparaciones
- Cambios de los módulos del catalizador, con una vida útil de 5 años.

Los costes anuales equivalentes mostrados en la tabla anterior, se calculan como la suma de los costes de capital anualizados y los costes de operación anuales

Este mismo cálculo se ha realizado con los datos suministrados por las empresas de ANFEVI, para un horno tipo y considerando los tres mismos escenarios que en el caso anterior.

Características del horno:

- Tipo de horno: Regenerativo Bucle
- Combustible: Gas natural, con apoyo eléctrico (Boosting)
- Capacidad de producción: 350 t/d
- Caudal de humos: 30.00 Nm³/h

Capacidad horno (t/d)	Inversión requerida (€)	Costes de capital anualizados (€) ⁽¹⁾	Costes de operación anuales (€)	Coste anual equivalente (€)
Escenario 1 - Medidas primarias básicas Nivel emisión NOx: 1.100 – 1.500 mg/Nm ³				
350 t/d Gas, bucle	142.000	19.293	30.000	49.293
Escenario 2 - Medidas primarias avanzadas Nivel emisión NOx: 800 mg/Nm ³				
350 t/d Gas, bucle	1.319.200	179.237	30.000	209.237
Escenario 3 - SCR (Reducción Catalítica Selectiva) Nivel emisión NOx: 500 mg/Nm ³				
350 t/d Gas, bucle	1.150.000	156.248	156.000	312.248

Fuente: ANFEVI, 2014

Como se puede observar los resultados de ambos cálculo son comparables, salvo en el caso de la inversión requerida en el escenario 1, que resulta ligeramente inferior en este caso.

(1) Calculado según costes capital anualizados (€/año) = costes equipos (€) * [(1+6/100)¹⁰] / [(1+6/100)¹⁰ - 1] * 6/100, siendo I=6% y ELE = 10.

XI. Análisis Coste Beneficio

Se trata en esta fase de integrar los datos recopilados y calculados con anterioridad, con la idea de obtener un dato comparable de coste económico frente a reducción obtenida con cada una de las medidas estudiadas.

Capacidad horno (t/d)	Toneladas de NOx reducidas al año	Coste anual equivalente (€)	Coste (€)/tonelada NOx reducida	Coste (€)/tonelada de vidrio fundida
Medidas primarias básicas				
Nivel emisión NOx: 1.100 – 1.400 mg/Nm ³				
200 t/d Gas, bucle	60,3	63.500	1.053	0,87
300 t/d Gas, bucle	60,3	74.400	1.234	0,68
450 t/d Gas, bucle 1.050 – 1.100 mg/Nm ³ NOx	90,5	87.900	971	0,54
450 t/d Gas, transversal	130	192.800	1.483	1,17
Medidas primarias avanzadas				
Nivel emisión NOx: 700 - 800 mg/Nm ³				
200 t/d 750 mg/Nm ³ NOx	82	137.100	1.672	1,88
300 t/d	112	168.300	1.503	1,54
450 t/d	168	205.500	1.223	1,25

Capacidad horno (t/d)	Toneladas de NOx reducidas al año	Coste anual equivalente (€)	Coste (€)/tonelada NOx reducida	Coste (€)/tonelada de vidrio fundida
SCR (Reducción Catalítica Selectiva) Nivel emisión NOx: 400 – 500 mg/Nm ³				
200 t/d	110	215.800	1.962	2,96
300 t/d	159	268.700	1.690	2,45
450 t/d	228	347.400	1.524	2,12

Fuente: *Best Available Techniques Reference Document for the Manufacture of Glass 2013*.

Datos actualizados 2014. Los datos recogidos en el documento de referencia son del año 2007. Se han actualizado considerando un IPC 2007-2014 del 15,1% (Fuente: INE, Instituto Nacional de Estadística).

Como en el apartado anterior, se ha realizado el mismo cálculo se ha realizado con los datos suministrados por las empresas de ANFEVI, para un horno tipo y considerando los tres mismos escenarios que en el caso anterior.

Capacidad horno (t/d)	Toneladas de NOx reducidas al año	Coste anual equivalente (€)	Coste (€)/tonelada NOx reducida	Coste (€)/tonelada de vidrio fundida
Medidas primarias básicas Nivel emisión NOx: 1.100 – 1.500 mg/Nm ³				
350 t/d Gas, bucle	123	49.293	402	0,39
Medidas primarias avanzadas Nivel emisión NOx: 800 mg/Nm ³				
350 t/d Gas, bucle	92	209.237	2.275	1,64
SCR (Reducción Catalítica Selectiva) Nivel emisión NOx: 500 mg/Nm ³				
350 t/d Gas, bucle	92	312.248	3.395	2,44

Fuente: ANFEVI, 2004

Como se puede deducir de los valores recogidos en las tablas anteriores e Independientemente de las limitaciones de su aplicabilidad a nivel industrial, para la industria vidriera un factor importante a considerar es el coste de la técnica SCR comparado con otras técnicas. La **Reducción Catalítica** es una técnica relativamente cara si se compara con la adopción de medidas primarias. Es por esto, que **no se considera** de forma general por la industria vidriera, esta técnica **como la más efectiva desde el punto de vista técnico-económico, para la reducción de las emisiones de NOx.**

La técnica tiene un elevado **coste de inversión** y unos **costes operativos** muy superiores a los asociados a las medidas primarias (tanto básicas como avanzadas).

Por ejemplo, en el caso de un horno de 300 t/d, los datos comparativos serían:

<i>Horno de 300 t/d</i>	Inversión requerida (€)	Costes de operación anuales (€)
Escenario 1: Medidas primarias básicas	328.000	29.900
Escenario 2: Medidas primarias avanzadas	1.019.00	29.900
Escenario 3: SCR	1.192.000	113.700

Fuente: *Best Available Techniques Reference Document for the Manufacture of Glass 2013*. Datos actualizados 2014.

Según los datos aportados por las empresas de ANFEVI:

<i>Horno de 350 t/d</i>	Inversión requerida (€)	Costes de operación anuales (€)
Escenario 1: Medidas primarias básicas	142.000	30.000
Escenario 2: Medidas primarias avanzadas	1.319.200	30.000
Escenario 3: SCR	1.150.000	156.000

Fuente: ANFEVI, 2014.

Se ha seleccionado un nivel de producción de 350 t/d porque es el nivel que puede considerarse más habitual de los hornos de fusión utilizados por las empresas de ANFEVI. Como se puede comprobar los datos procedentes de las fuentes utilizadas (*Fuente 1: Best Available Techniques Reference Document for the Manufacture of Glass 2013* y *Fuente 2: ANFEVI*) son similares, salvo en el caso de medidas primarias básicas, ya que es probable que algunas de dichas medidas se clasifiquen como avanzadas por el sector.

Aunque la inversión requerida en la **implantación de medidas primarias avanzadas** es similar a la del SCR (en torno a 1 M€), hay que destacar que en el primer caso se producen efectos **beneficiosos** en otros aspectos, como:

- **no se genera ningún otro aspecto medioambiental significativo** (efectos cruzados),
- produce a menudo **ahorros significativos de energía**,
- se producen **menores emisiones globales** como consecuencia de temperaturas del horno menores y **menor consumo de energía**.

Adicionalmente, los costes anuales de operación son considerablemente superiores; para una capacidad de 350 t/d, los costes alcanzan los 156.000 € con SCR frente a 30.000 € con medidas primarias (tanto básicas como avanzadas).

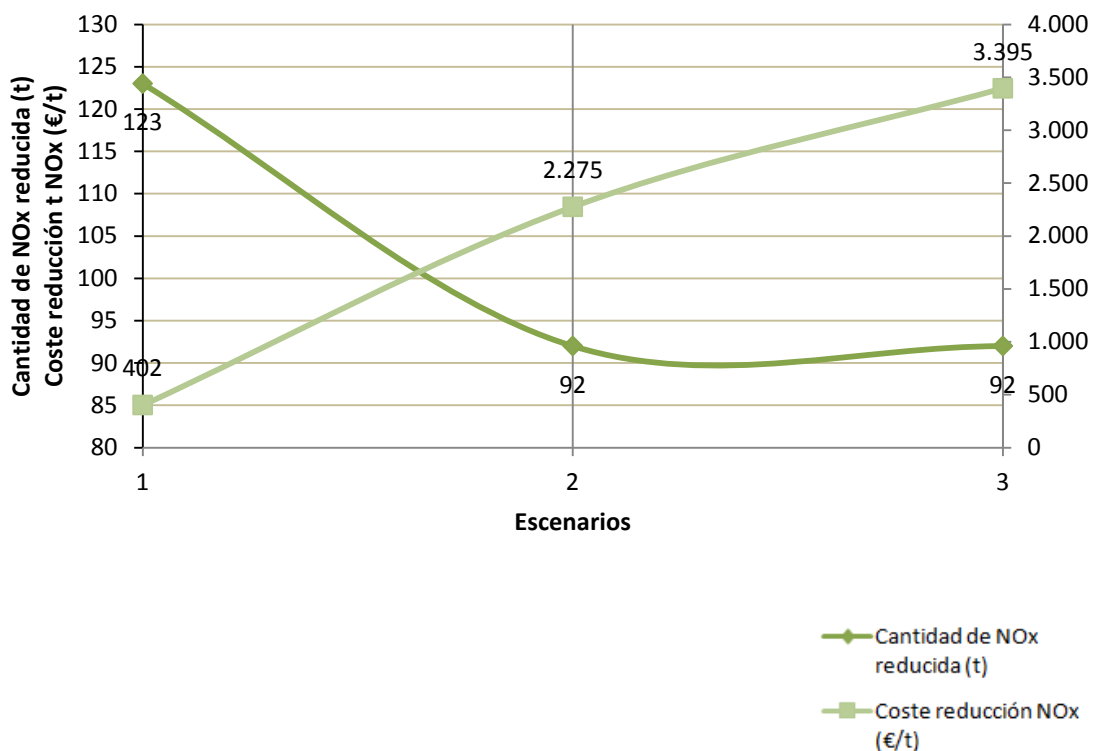
Una parte considerable del coste de operación de la técnica SCR está asociado al consumo y almacenamiento de NH₃.

Si consideramos el coste por tonelada de NOx para la tecnología SCR se obtienen los mejores resultados para hornos grandes (de 450 t/d), con un valor de 1.524 €/t, y se consiguen reducciones considerables (228 toneladas de NOx).

Según los datos disponibles para un horno de 350 t/d:

	Toneladas de NOx reducidas al año	Costes (€)/tonelada NOx reducida
Escenario 1: Medidas primarias básicas	123	402
Escenario 2: Medidas primarias avanzadas	92	2.275
Escenario 3: SCR	92	3.395

Fuente: ANFEVI, 2014.



La realidad actual de las empresas de ANFEVI es que cuenta con hornos de capacidad inferior, más próximos a 350 t/d, por lo que la **relación coste-eficiencia no es la óptima (menores reducciones y mayores costes por tonelada de NOx reducida)**.

Si consideramos, el coste por tonelada de vidrio fundido (tvf), el coste de la implantación de la técnica SCR supone un incremento del 49% en el coste.

	Medidas primarias avanzadas	SCR
Horno de 350 t/d	1,64 €/tvf	2,44 €/tvf

Fuente: ANFEVI 2014