



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA  
DE MEXICO**

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES  
CUAUTITLAN**

**" EMISIONES CONTAMINANTES EN HORNOS  
PARA VIDRIO "**

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

**INGENIERO QUIMICO**

**P R E S E N T A**

**ENRIQUE BAQUERIE GONZALEZ**

**ASESOR: I.Q. MARGARITA ALONSO ESPINOSA**

**CUAUTITLAN IZCALLI, EDO. DE MEX.**

**1997**

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN.  
UNIDAD DE LA ADMINISTRACION ESCOLAR  
DEPARTAMENTO DE EXAMENES PROFESIONALES

UNIVERSIDAD NACIONAL  
AVENIDA DE  
MEXICO

ASUNTO: VOTOS APROBATORIOS

DR. JAIME KELLER TORRES  
DIRECTOR DE LA FES-CUAUTITLAN  
P R E S E N T E .

AT'N: Ing. Rafael Rodriguez Ceballos  
Jefe del Departamento de Exámenes  
Profesionales de la F.E.S. - C.

Con base en el art. 28 del Reglamento General de Exámenes, nos permitimos comunicar a usted que revisamos la TESIS TITULADA:

Emissiones contaminantes en hornos para vidrio.

que presenta el pasante: Enrique Baquerie González.

con número de cuenta: 8136496-5 para obtener el TITULO de:  
Ingeniero Químico

Considerando que dicha tesis reúne los requisitos necesarios para ser discutida en el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APROBATORIO.

A T E N T A M E N T E .

"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"

Cuatitlán Izcalli, Edo. de Méx., a 14 de Noviembre de 1996.

PRESIDENTE I.Q. Fernando Orozco Ferreyra.

VOCAL I.Q.I. Alvaro Leo Ramirez

SECRETARIO I.Q. Margarita Alonso Espinosa

PRIMER SUPLENTE I.Q. Eligio Pastor Rivero Martínez

SEGUNDO SUPLENTE I.Q. Gilberto Atilano Amaya Ventura

**A MIS QUERIDOS PADRES:**

**Mi profundo agradecimiento por su cariño, esfuerzo, apoyo incondicional y sincero que me ha servido para encontrar el sendero por el cual he aprendido a dar lo mejor de mí cada día.**

**A MI LUCERO Y ALEX:**

**Cuya fe, afecto, amor y apoyo me impulsaron para seguir adelante y concluir esta obra.**

**A MIS HERMANAS:**

**Por prestarme tanto apoyo, estar siempre disponibles y principalmente por confiar en mí.**

**A MIS PROFESORES :**

**Quienes me enseñaron a " ver ", " auto - educarme " y " prestar atención ", herramientas valiosas de las que dispongo para cristalizar mis ideas y aplicarlas en mi vida profesional.**

**... y a todos mis amigos a quienes quiero y estimo.**

**Gracias...**

# I N D I C E

	Pag.
<b>OBJETIVO Y RESUMEN</b>	<b>1</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>2</b>
<b>GENERALIDADES</b>	<b>3</b>
<b>CAPITULO I</b>	
<b>CAUSAS DE EMISIONES CONTAMINANTES EN HORNO PARA MANUFACTURA DE VIDRIO</b>	<b>11</b>
1.1. FORMACIÓN DE SO <sub>x</sub>	16
1.2. FORMACIÓN DE NO <sub>x</sub>	17
1.3. FORMACIÓN DE PARTÍCULAS	19
<b>CAPITULO II</b>	
<b>MARCO JURÍDICO ECOLÓGICO EN LA INDUSTRIA DEL VIDRIO</b>	<b>20</b>
<b>CAPITULO III</b>	
<b>EFFECTOS DE CONTAMINANTES DEL AIRE EN PLANTAS, ANIMALES Y HUMANOS.</b>	<b>38</b>
3.1. EFECTOS DE CONTAMINANTES DEL AIRE EN HUMANOS	40
3.1.1. EFECTOS DEL BIÓXIDO DE AZUFRE ( SO <sub>2</sub> )	40
3.1.2. EFECTOS DE LOS ÓXIDOS DE NITRÓGENO	43
3.1.3. EFECTOS DEL OZONO Y OXIDANTES	45
3.1.4. EFECTOS DEL MONÓXIDO DE CARBONO ( CO )	48
3.2. EFECTOS CONTAMINANTES DEL AIRE EN PLANTAS Y ANIMALES	52
3.2.1. EN PLANTAS	52
3.2.2. EN ANIMALES	55
<b>CAPITULO IV</b>	
<b>EQUIPOS PARA CONTROL DE EMISIONES CONTAMINANTES EN LOS HORNO PARA VIDRIOS</b>	<b>57</b>
4.1. MÉTODOS PRIMARIOS	58
4.1.1. CRITERIOS DE SELECCIÓN PARA HORNO DE FUSIÓN	66
4.1.1.1. HORNO CON COMBUSTIBLE FÓSIL	66
4.1.1.2. HORNO DE COMBUSTIBLE FÓSIL Y AYUDA ELÉCTRICA	71
4.1.1.3. HORNO ELÉCTRICO	73
4.1.2. ADECUACIONES EN MATERIAS PRIMAS	74
4.2. MÉTODOS SECUNDARIOS	76
4.2.1. CÁMARAS DE SEDIMENTACIÓN	76
4.2.2. COLECTORES POR INERCIA Y CICLONES	77
4.2.2.1. COLECTORES	77

	<b>Pag.</b>
4.2.2.2. CICLONES	80
4.2.3. PRECIPITADOR ELECTROSTÁTICO	82
4.2.3.1. DISPOSICIÓN DE LOS SISTEMAS DE ELECTRODOS DE DOS ETAPAS	83
4.2.3.2. DISPOSICIÓN DE LOS SISTEMAS DE LOS ELECTRODOS DE UNA ETAPA	84
4.2.3.3. PRECIPITADORES ELECTROSTÁTICOS COMERCIALES	85
4.2.4. FILTRACIÓN	86
4.2.5. LAVADORES Y ABSORBEDORES HÚMEDOS	88
4.2.5.1. TORRE DE PULVERIZACIÓN POR GRAVEDAD	89
4.2.5.2. ABSORBEDORES DE PULVERIZACIÓN AUTOINDUCIDA	90
4.2.5.3. ABSORBEDORES DE CHOQUE	91
4.2.5.4. ABSORBEDORES DE ALTA ENERGÍA	93
4.2.5.5. ASPECTOS PRÁCTICOS DE LA APLICACIÓN DEL ABSORBEDOR	94
4.2.5. AGLOMERACIÓN SONICA Y ULTRASONICA	95
4.2.6. EQUIPOS PARA CONTROL DE EMISIONES EN LA INDUSTRIA DE VIDRIO	96
 <b>CAPITULO V</b>	
<b>HORNO ECOLÓGICO EN LA INDUSTRIA DEL VIDRIO</b>	<b>112</b>
5.1. AVANCES TECNOLÓGICOS EN QUEMADORES PARA EL SISTEMA OXI-GAS	122
5.1.1. QUEMADORES DE FLAMA DE ALTA TEMPERATURA	122
5.1.2. QUEMADORES DE BAJO MOMENTUM ( DESARROLLO DE FLAMA )	126
5.1.3. QUEMADOR DE FLAMA DE BAJA TEMPERATURA	129
5.2. TECNOLOGÍA PARA REDUCIR EL COSTO DE OXIGENO	130
5.3. FUENTES DE NITRÓGENO EN HORNOS OXI-GAS	133
 <b>CAPITULO VI</b>	
<b>CONCLUSIONES</b>	<b>134</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS</b>	<b>136</b>

**OBJETIVO  
Y  
RESUMEN**

## **OBJETIVO:**

Revisión bibliográfica y hemerográfica de las principales emisiones contaminantes de hornos en la manufactura de vidrio, con las cuales se persiguen los objetivos siguientes:

- Conocer las principales emisiones contaminantes generadas en hornos de fusión de vidrio.
- Investigar las normas y legislaciones que establecen los límites máximos permisibles de emisiones a la atmósfera de material particulado y óxidos de nitrógeno.
- Señalar el efecto de las emisiones contaminantes en la salud de las personas, plantas y animales.
- Revisión de los diferentes equipos y sistemas existentes para reducir las emisiones contaminantes en la industria del vidrio.

## **RESUMEN:**

En este trabajo se hace una revisión bibliográfica y hemerográfica de las emisiones contaminantes de los hornos utilizados en la industria del vidrio.

Descripción de los principales contaminantes producidos con diferentes combustibles utilizados en hornos de fusión de vidrio y el marco jurídico ecológico en la industria del vidrio.

Efecto de emisiones contaminantes en la salud de las personas y el equilibrio ecológico.

Análisis de las diferentes soluciones para reducir las emisiones contaminantes generadas por los hornos utilizados en la industria del vidrio.

Revisión del sistema "oxi-fuel" como uno de los métodos más eficaces para reducir las emisiones de óxidos de nitrógeno (NOx) en la industria vidriera.



## INTRODUCCIÓN

## INTRODUCCIÓN

En nuestro país y particularmente en el valle de México la problemática generada por los contaminantes que la industria en general ha enviado cotidianamente a la atmósfera ha repercutido de manera importante en el equilibrio ecológico.

A pesar de la gran importancia que el equilibrio ecológico representa, no ha sido sino hasta la época actual en que las autoridades, la industria y la comunidad en general han considerado generar acciones que permitan reducir los niveles de las emisiones de contaminantes.

Es natural que ante la indiferencia de muchos años la problemática provocada es en extremo compleja e imposible de resolverse a corto plazo. La problemática ambiental de la industria a nivel mundial es compleja y su solución implica cambios de raíz en muchas de las tecnologías y esquemas de trabajo actualmente utilizados.

En la industria de México es más crítica, debido a que, dado el rezago tecnológico y los problemas económicos de que adolece la industria actualmente, la mayoría de las unidades productivas del país operan con tecnologías viejas que no fueron orientadas desde su desarrollo a la protección del medio ambiente.

La industria vidriera mundialmente es considerada como una industria básica, ya que el vidrio tiene contacto , directa o indirectamente con todas las actividades fundamentales del hombre. En la actualidad se le han dado al vidrio miles de formas y matices aprovechando su versatilidad para adoptar diversidad de formas sin perder su resistencia característica.

La industria vidriera de hoy es un campo altamente especializado que emplea todas las herramientas de la ciencia moderna en la producción, control y desarrollo de sus múltiples productos, producidos con distintos tipos de vidrios dependiendo de la aplicación que se requiera.

La mayor producción de vidrio en México y en el mundo en general es el tipo " Sódico - Cálcico " que se utiliza para la fabricación de vidrio para envases y vidrio plano el cual es indispensable en la arquitectura e industria automotriz principalmente.

Para formar el vidrio se utilizan materias primas que generan gases durante el proceso y combustibles fósiles para fundir la mezcla de materiales. La industria del vidrio tiene la necesidad de instalar y operar sistemas de control de contaminación.

Las principales emisiones contaminantes de la fusión del vidrio al utilizar combustibles fósiles son partículas, óxido de azufre, óxido de nitrógeno y en menor proporción, también se emiten óxidos de carbono, vapor de agua y oxígeno.

Con la presente revisión bibliográfica es propósito del autor señalar las principales emisiones contaminantes generadas en hornos de fusión de vidrio, así como las normas y legislaciones que establecen los límites máximos permisibles de emisiones a la atmósfera de material particulado y óxidos de nitrógeno en los procesos de fabricación de vidrio a nivel mundial y en especial en México.

También se hace una revisión de los diferentes equipos y sistemas existentes para reducir las emisiones contaminantes en la industria de vidrio, ya que es una área de desarrollo para el Ingeniero Químico , que es el especialista que mejor conoce el proceso y por ende el que puede determinar el equipo y los sistemas de control adecuados para reducir las emisiones de contaminantes.

## GENERALIDADES

## GENERALIDADES

La aparición del vidrio data del cuarto o quinto milenio antes de nuestra era, en zonas de Asia menor, de Mesopotamia y del antiguo Egipto existían cuentas y pequeños trozos trabajados, definibles como vidrio; los arqueólogos piensan que el vidrio se originó en las cerámicas, cuando se agregaron a la mezcla, accidentalmente o no, sustancias como el nitrógeno o cenizas vegetales que disminuían el punto de fusión de la sílica. El vidrio nació como material definible como tal cuando se le comenzó a fabricar independientemente.

En México la industria del vidrio aparece en Puebla a mediados del siglo XVI ya que por el año 1547, Rodrigo de Espinosa producía vidrio cristalino, verde y azul que se exportaba hasta Guatemala y Perú. Sin embargo debido al incipiente desarrollo del país, la demanda de productos de vidrio era muy reducida, tendiendo a desaparecer como industria y continuar como de carácter artesanal.

Fue hasta 1909 cuando la fabricación de vidrio adquirió importancia industrial al establecerse en la ciudad de Monterrey, la Vidriera Monterrey que se dedicó en un principio a la fabricación de botellas y posteriormente a toda clase de envases. En 1930 también en la ciudad de Monterrey se fundó la primera fábrica de vidrio plano y posteriormente en la ciudad de México se crea Vidriera México S.A., productora de envases con maquinaria automática.

Al año siguiente nace Cristalería Monterrey S.A. y por esa misma época se establece la Fábrica Nacional de Vidrio S.A. en la ciudad de México dedicada a la fabricación de envases para cerveza principalmente. Ya estando en pleno desarrollo la industria vidriera en 1946, se fundaron tres plantas más en la ciudad de Monterrey y una más en la ciudad de México.

En la actualidad existen en México aproximadamente trece plantas dedicadas a la fabricación de envases, tres de vidrio plano, tres de vidrio borosilicato (una de fibra de vidrio, una de material de vidrio para laboratorio y apolletas y una fábrica de Silicato) y una de cristalería. También existen numerosos talleres donde se producen productos de vidrio por métodos empíricos y procesos manuales.

Con la aprobación de Tratado de Libre Comercio entre México, Canadá y E.U.A. existe la posibilidad de que se instalen más plantas productoras de vidrio de países extranjeros, principalmente europeos que quieren entrar por México al mercado de E.U.A. Es posible que el tipo de industria que se instale sea de vidrio calizo para envases y vidrio plano, ya que en México se cuenta con los suficientes yacimientos de arena sílica que es la principal materia prima que se utiliza para la fabricación de vidrio.

La industria nacional sabe de esta posibilidad por lo cual algunas plantas buscan en forma organizacional depurar su estructura y establecer un modelo de aseguramiento de calidad según los requerimientos de ISO 9001. El cual es un modelo de aseguramiento de calidad mundial, aplicable al diseño, fabricación, instalación y servicio que permite proveer a los clientes de productos que cumplan con los requisitos acordados y obteniendo además beneficios como los siguientes entre muchas ventajas más:

1. Competitividad mundial.
2. Apertura de nuevos mercados.
3. Garantizar al cliente los productos fabricados.
4. Mayor productividad y menor pérdida.
5. Mejor desempeño del personal.
6. Reconocimiento de servicio por el cliente.
7. Garantizar la permanencia en los mercados.

Para poder comprender de mejor manera el proceso y todo lo que involucra la industria del vidrio es importante definir y clasificar los diferentes vidrios que existen [1].

**El vidrio se puede definir de dos formas:**

1. Químicamente se define como la unión de óxidos inorgánicos por la descomposición y fusión de compuestos alcalinos, alcalinotérreos, arena sílica y otros constituyentes.
2. En forma física como un líquido subenfriado rígido sin punto de fusión definido y una viscosidad suficientemente alta para prevenir la cristalización.

**Los vidrios en forma comercial se pueden clasificar en cinco diferentes clases:**

1. **Sílica Vitrea:** Es un vidrio producido con sílica pura en ausencia de fundente. Se caracteriza por su baja expansión y alto punto de suavización, que dan una alta resistencia térmica.
2. **Silicatos de Alkali:** Son vidrios solubles empleados únicamente como soluciones. Estos son los únicos vidrios de dos composiciones con importancia comercial donde el carbonato de sodio y la arena sílica simplemente se funden para formar productos conocidos como Silicato de Sodio.
3. **Vidrios Soda - Cal - Sílice o Sódico-Cálcico:** Estos representan el grupo más importante que se utiliza para la manufactura de vidrio para envases y vidrio plano. La composición química esta dentro de los siguientes límites:

SiO <sub>2</sub>	69.5 - 72.5 %
CaO	12.5 - 13.5 %
Na <sub>2</sub> O	13.0 - 15.0 %

A éstos se les agregan óxidos estabilizadores para modificar sus propiedades físicas como expansión térmica, resistencia mecánica, fragilidad y viscosidad. Los principales estabilizadores son Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, K<sub>2</sub>O y MgO. Este tipo de vidrios no funden a muy alta temperatura y son lo suficientemente viscosos para trabajarse a temperaturas razonables.

4. **Vidrios de Plomo:** Son vidrios para efectos decorativos y ópticos obtenidos del óxido de plomo, sílice y álcalis.
5. **Vidrios Bóricos:** Generalmente compuestos por 10 a 13 % de B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y de 80 a 83 % de SiO<sub>2</sub>. Tienen bajo coeficiente de expansión, resistencia a golpes, estabilidad química y resistencia eléctrica. Debido a estas propiedades se emplean para la fabricación de material de laboratorio, aislantes, etc.

En la tabla 1 se resume la composición química de diversos vidrios comerciales; se observa que, con pocas excepciones, el componente principal es la sílice o dióxido de silicio (SiO<sub>2</sub>). Se observa también, la gran diversidad de sustancias que pueden formar vidrio.

T A B L A 1

## COMPOSICIÓN QUÍMICA TÍPICA DE DIVERSOS VIDRIOS [1]

TIPO DE VIDRIO	SiO <sub>2</sub>	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	CaO + MgO	PbO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	OTROS
Perlas Blancas Egipcias	71.8	-	18.8	-	8.6	-	0.8	FeO + Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Botella Romana Verde	68.1	-	20.5	-	7.0	-	1.3	„
Vidrio Plano	72.5	-	13.5	-	12.0	-	0.1	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Vidrio de Espejo	70.6	-	11.8	-	16.9	-	0.6	„
Vidrio de Envases Cristalino	72.1	-	14.4	0.4	10.4	-	1.9	„
Vidrio de Envases Verdes	67.4	-	11.9	1.7	10.0	-	5.9	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + MnO
Termorresistentes	81.0	12.0	4.5	-	-	-	2.0	
Vidrio para Lámparas Eléctricas	71.0	-	17.0	0.9	7.0	-	1.2	
Vidrio Óptico Flint	45.2	-	-	6.8	0.4	47.1	0.8	
Cristal de Plomo	52.4	-	0.1	11.9	1.7	35.2	1.0	
Fibra de Vidrio	54.5	8.5	0.5	-	22.0	-	14.5	
Material de Laboratorio	72.5	5.5	7.0	2.0	2.0	-	4.7	

Las materias primas o materiales necesarios en la elaboración del producto generalmente se divide en ingredientes mayores y menores, según sea la cantidad e importancia con la que participan en la composición química del vidrio. En la industria vidriera las siguientes materias primas se identifican como ingredientes mayores :

**Arena Silica**

**Feldespato**

**Dolomita**

**Caliza**

**Carbonato de Sodio**

**Cullet \***

SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; K<sub>2</sub>O, Na<sub>2</sub>O, CaO

SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO, MgO

SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO, MgO

Na<sub>2</sub>O

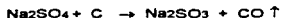
\* Cullet: término utilizado para definir la mezcla de pedacería de vidrio propio ( de recirculación de la misma planta ) y foráneo ( vidrio procesado en los centros de reciclado ).

Entre los ingredientes menores se encuentran el Carbón, Selenio, Cobalto, Arsénico, Espatoflúor y Hematita. Los ingredientes mencionados no son los únicos, pero si los de mayor empleo en la industria del vidrio tipo Sódico-Cálcico.

Las reacciones químicas involucradas en la fabricación de vidrio pueden resumirse en las siguientes:



El carbón se emplea como reductor del sulfato de sodio que lo reduce a sulfito para que éste se descomponga en  $\text{Na}_2\text{O}$  y  $\text{SO}_2$ , casi al final de la fundición de manera que cumpla su función básica de afinante.



En el proceso de fundición donde la mezcla pasa del estado sólido a líquido, se efectúan reacciones químicas entre ellos. El resultado de dichas reacciones y fundición será una masa viscosa que al solidificarse dará origen al vidrio.

La carga\* alimentada a los hornos queda expuesta a la energía calorífica del interior del horno; recibe calor por la radiación de la flama en la parte superior de la carga y en la parte inferior recibe calor por conducción y convección.

Los materiales de la mezcla con un menor punto de fusión se funden más rápidamente y reaccionan con los materiales de alto punto de fusión, bajando el punto de fusión de la carga.

Las reacciones del proceso se dividen en reacciones de baja temperatura y de alta temperatura. En las reacciones de baja temperatura intervienen los materiales con menor punto de fusión, estos se funden más rápidamente y reaccionan con los materiales de alto punto de fusión, bajando el punto de fusión de toda la carga.

Las reacciones de baja temperatura se llevan a cabo en la parte delantera del horno, desde la zona de alimentación de la mezcla hasta la línea de flotación (zona en el horno donde la carga empieza a pasar del estado sólido a líquido). En esta reacción intervienen principalmente la Soda Ash ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ), que junto con el sulfato reducido a sulfito por el carbón, atacan a la sílice de la arena sílica facilitando su fusión.

Debido a la baja densidad de la arena, parte de ésta flota en la superficie y se adelanta pasándose de la línea de flotación. En la misma forma el sulfato restante de la reacción a baja temperatura, flota y se adelanta y en combinación con la arena sílica (material de mayor punto de fusión en la carga) se efectúa la reacción de alta temperatura.

Todos los componentes de la mezcla a excepción de la arena sílica y el feldespato, tienen la propiedad de descomponerse en óxidos desprendiéndose gases durante su fundición, los gases salen a la superficie del vidrio en forma de burbujas causando una ebullición, ayudando a homogeneizar la carga.

\* Carga: mezcla de ingredientes mayores y menores.

Estos gases liberados también ocasionan la formación del Carry-Over \*. En la industria del vidrio para un horno del tipo regenerativo que funde vidrio para envases, el " Carry-Over " tiene una composición química aproximada de :

% SiO <sub>2</sub>	24.5	-	28.8
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.28	-	0.32
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.12	-	0.25
CaO	0.96	-	1.20
MgO	0.12	-	0.30
Na <sub>2</sub> O	22.30	-	27.30
K <sub>2</sub> O	0.91	-	1.25
SO <sub>3</sub>	32.3	-	45.0

### TIPOS DE HORNOS EN LA INDUSTRIA VIDRIERA

Existe una variedad de hornos para la fundición del vidrio [2], diseñados según el tipo de vidrio que se va a utilizar para la formación de los diversos productos elaborados.

Los hornos que se utilizaban a mediados o mediados del siglo pasado en la formación de envases eran los hornos tipo " Crisol ", estos hornos eran abiertos o cubiertos. Los abiertos eran calentados rápidamente, pero estaban sujetos a problemas de defectos de formación, debido a la volatilización que se tenía durante el proceso de fundición.

Los crisoles cubiertos eran calentados lentamente, aunque en el proceso se tenía un mayor control eran poco usados por lo tardado de su calentamiento ( más de 24 horas ). La operación de formado de envases en este tipo de hornos era en forma manual principalmente.

En la actualidad, a nivel industrial, los hornos tipo " Crisol " es todavía usado para fundir vidrios de cristal de plomo , pero con modificación a un sistema eléctrico de calentamiento. En general los más utilizados en la industria vidriera dividen en dos categorías:

1. Tanque de día: son llenados en un día ( capacidad de 2 toneladas ) y su operación es hasta el siguiente día .
2. Tanques continuos: son llenados el día que se calienta el horno y su operación es continua ( las 24 horas del día ) hasta que termina su vida útil ( de 5 a 10 años ). Existen diferentes tipos de hornos de acuerdo al vidrio que se requiere fabricar, estiraje\*\*, inversión y consideraciones de diseño.

Los hornos más empleados en la industria del vidrio son los del tipo continuo, entre los más comunes tenemos :

1. Hornos con cámaras regeneradoras y puertos laterales o traseros.
2. Hornos con recuperadores de calor ( Cerámico o metálico )
3. Hornos con fundidor sencillo ( Unit Melter ) .

\* Carry-Over : son los residuos acumulados en las chimeneas, cámaras regeneradoras, puertos, etc. de partículas volátiles de las materias primas, arrastrados por los gases liberados en la fusión.

\*\* Estiraje: toneladas fundidas de vidrio por día.



Estos tipo de hornos consta principalmente de las siguientes partes:

- a).- **Fundidor**; es la parte del horno donde se funde la carga introducida a la zona de fusión por los cargadores\*. La fundición ocurre en las tres cuartas partes de la longitud del horno, la temperatura que se maneja en esta zona es de  $1550 \pm 20$  °C.
- b).- **Refinador**; es la parte donde se eliminan los gases de fundición. La refinación ocurre en una cuarta parte de la longitud del horno y la temperatura en esta zona es de 1500 a 1300 °C.
- c).- **Garganta**; estrechamiento de 24 a 30 pulgadas de ancho y 12 pulgadas de altura, que conecta al refinador con la zona de trabajo. Las gargantas pueden ser estándar, submarinas, semisubmarinas, largas, inclinadas y profundas.
- d).- **Zona de trabajo**; se le llama así a la parte que tiene como función estabilizar la temperatura del vidrio que pasó por la garganta, para alimentarlo a las máquinas y formar los productos deseados. La temperatura de acondicionamiento es de 1300 a 1100 °C.

Las dimensiones de hornos típicos son:

**Ancho** : de 10 pies (3 m) para un mínimo desarrollo de la flama, a 24 pies ( 7 m ) para una distancia máxima del claro de la bóveda

**Área de fundición** : de 150 a 1400 pies cuadrados, con un promedio de 700 a 800 pies cuadrados ( en la industria vidriera que fabrican envases, se maneja un área de fundición de 4 a 5 pies cuadrados por tonelada de vidrio fundido. Este valor variará dependiendo del color de vidrio a fundir, estiraje, profundidad del vidrio, edad del horno, cantidad de cullet a manejar en la carga, etc. ).

**Longitud** : la relación de largo entre ancho es usualmente de 1.5 aproximadamente.

#### **Hornos regenerativos:**

Se les llama regenerativos debido a que aprovechan una mayor cantidad de energía calorífica de combustible, recuperando los gases de combustión por medio de dos cámaras intercambiadoras de calor, las cuales pueden estar en la parte trasera del horno ( Hornos de puertos\*\* atrás o " End Port " ) o a los lados del horno ( Hornos de puertos laterales o " Side Port " ).

Las cámaras regeneradoras son unidades intercambiadoras de calor construidas por checkers\*\*\* y estas cámaras tienen como objetivo dos cosas:

1. Absorber el exceso de calor que llevan los gases de combustión ( 1500 °C ).
2. Precalentar el aire necesario para la combustión.

Estos hornos operan con el quemado de gas por un puerto, mientras el otro puerto sirve para sacar los gases de combustión del fundidor. Para mantener esta función continua dual, el sistema cuenta con dos túneles con un dispositivo de compuertas o válvulas de cambio .

\* Cargadores: equipo automático que dosifica la carga al horno.

\*\* Puerto: túnel que comunica el fundidor con las cámaras regeneradoras.

\*\*\* Checkers: Arreglo de ladrillos refractario en forma de enrejado ( varía el diseño del arreglo ).

El intervalo de tiempo entre los cambios de quemadores en un horno de vidrio usualmente varía entre 20 y 30 minutos.

El funcionamiento dual de las cámaras regeneradoras inicia cuando los gases de combustión salen propiamente del horno a través de los puertos, y luego el flujo de gases calientes continúa a través de los checkers de la cámara. El calor es absorbido por los checkers al estar pasando los gases.

Al atravesar el flujo de gases toda el área de checkers de la cámara, son llevados a través de uno de los túneles que tendrá abierta la compuerta para sacar los gases a la atmósfera por la chimenea.

Después del cambio de quemadores, el túnel, la cámara regenerativa y el puerto que previamente fueron usados para manejar los gases de salida, se usan para precalentar el aire de combustión. El calor absorbido por los checkers al estar pasando los gases, ahora es cedido al aire de combustión que entra al fundidor.

A través de los puertos pasa el aire necesario para efectuar la combustión, el cual se mezcla con el combustible poco antes de entrar a la cámara de combustión. El combustible es conducido a los puertos por un sistema de tubería y se inyecta por unos orificios localizados en las paredes del bloc quemador de refractario.

La temperatura de aire precalentado va decreciendo como el ciclo progresa y continúa disminuyendo hasta que se efectúa el siguiente cambio. La temperatura promedio del aire precalentado durante la operación, varía entre 800 y 1300 °C, dependiendo del área expuesta de los checkers, cantidad de aire alimentado, temperatura del horno, tiempo que duran trabajando los quemadores por cámara, diseño y operación de la cámara regeneradora.

Los hornos de puertos atrás tienen solamente dos puertos y los hornos de puerto a los lados, tienen de cuatro a ocho puertos, dependiendo del tamaño del horno.

Los hornos regeneradores con puertos a los lados son unidades grandes que pueden dar un estiraje promedio de 500 ton/día de vidrio fundido y los del tipo de puertos atrás son unidades pequeñas que como máximo dan un estiraje de 250 ton/día de vidrio fundido.

#### **Hornos recuperativos:**

Se les llama recuperativos debido a que aprovechan una mayor cantidad de energía calorífica de combustible, recuperando los gases de combustión por medio de uno o dos recuperadores de calor.

Un recuperador de calor es una unidad intercambiadora de calor, la cual precalienta el aire necesario para la combustión. El o los recuperadores están colocados a los lados de la parte trasera del horno y los quemadores se encuentran colocados a los costados del horno; el número y arreglo dependerá del largo y ancho del horno.

El tamaño, número y diseño del recuperador dependerá del tamaño de horno, estiraje y área disponible. Los recuperadores en general son cilindros metálicos de gran altura, recubiertos en su parte interior de material refractario aislante.

En la parte interior de recuperador después del recubrimiento del material refractario, se tiene una serie de tubos metálicos, que están en contacto continuo con el flujo de gases de combustión del horno. En el interior de los tubos pasa el aire provenientes de los ventiladores.

Estos tubos soportan altas temperaturas y se encuentran colocados en un arreglo en forma de jaula. Por la parte superior de la "jaula" se alimenta el aire a temperatura ambiente y por la parte inferior sale el aire precalentado para utilizarlo en el sistema de quemadores.

El flujo de gases de combustión en los recuperadores es controlado por unas compuertas que se encuentran en la parte superior del recuperador, las cuales gradúan el flujo de gases que sale a la atmósfera por la chimenea.

El intervalo de temperatura del aire precalentado producido por los recuperadores de calor es de 700 a 800 °C. Este tipo de recuperadores es utilizado en hornos con una capacidad de extracción de vidrio fundido de 200 a 300 toneladas por día.

El consumo de combustible en este tipo de hornos es mayor que en los del tipo regenerativo por la eficiencia de recuperación de calor que tiene cada sistema. Algunas de las ventajas de usar recuperadores de calor es que requieren una inversión inicial menor en su construcción y no requieren de mantenimiento continuo como las cámaras regeneradoras.

#### **Hornos sencillos:**

Este tipo de hornos son unidades pequeñas similares a los hornos recuperativos pero sin recuperadores de calor. El horno más grande con ayuda eléctrica tiene una capacidad máxima de extracción de vidrio fundido de 100 toneladas por día, éste es un caso especial; los más usuales son diseñados para producir de 30 a 40 ton/día de vidrio fundido.

Los gases de combustión para este tipo de hornos salen por una chimenea que está sobre el cargador, pudiendo estar a los lados del horno, este sistema de contra corriente de quemado es poco eficiente. Se requiere de un 35 a un 45 % más de combustible por operación normal que un horno del tipo regenerativo.

Para este tipo de hornos se tiene las siguientes ventajas y desventajas:

#### **Ventajas:**

- Bajo costo de construcción.
- Operación sencilla.
- Menor espacio utilizado.

#### **Desventajas:**

- Consumo alto de energéticos.
- Emisiones altas de partículas.
- Limitación de estiraje.

Por lo anterior este tipo de hornos no es muy utilizado en la industria vidriera, aunque algunas pequeñas industrias vidrieras en el país lo utilizan con resultados no muy favorables.



**CAUSAS DE EMISIONES  
CONTAMINANTES EN HORNOS  
PARA LA MANUFACTURA DE  
VIDRIO**

## CAPITULO I

### CAUSAS DE EMISIONES CONTAMINANTES EN HORNOS PARA MANUFACTURA DE VIDRIO

Para la mayoría de hornos de fusión para vidrio, las principales emisiones contaminantes a la atmósfera son óxidos de nitrógeno, óxidos de azufre y partículas. Los niveles de estos contaminantes son influenciados por el tipo de combustible utilizado, temperaturas de fusión, combustión, materias primas utilizadas, diseño de quemadores y del mismo horno principalmente.

También el bióxido de carbono se adiciona a la lista de emisiones atmosféricas, así como el ácido clorhídrico, ácido fluorhídrico y vapor de agua. Estas emisiones ocurren en pequeñas cantidades pero también son importantes en el impacto ambiental que ocasionan.

Klamp G. Reporta la composición típica de las emisiones de gases generados por hornos en la manufactura de vidrio en Europa [3] :

COMPONENTE	% VOL.	mg/Nm <sup>3</sup> *
CO <sub>2</sub>	8 - 16	
N <sub>2</sub>	73 - 75	
O <sub>2</sub>	2 - 12	
H <sub>2</sub> O	8 - 15	
SO <sub>2</sub>		1000 - 2000
SO <sub>3</sub>		100 - 200
HF		5 - 30
HCl		40 - 180
NO <sub>x</sub>		1000 - 4000

En las emisiones de los hornos también se tienen partículas que resultan de la vaporización de los materiales de la carga y del Carry-Over. Un estudio llamado Evaluación de la Industria del Vidrio dirigido por la IERL ( Industrial Research Laboratory )[4] sobre emisiones contaminantes en la industria de vidrio calizo en los Estados Unidos de Norteamérica, reportó que los contaminantes primarios en los hornos para vidrio Sódico - Cálcico son tres principalmente:

CONTAMINANTE	FUENTE
SO <sub>x</sub>	Combustible y Carga
NO <sub>x</sub>	Combustible, Nitrógeno en el Aire y Carga.
Partículas	Combustible y Carga

En la tabla 2 se resumen los datos obtenidos de las emisiones resultantes colectadas durante el programa de muestreo del IERL [4]. En el estudio se encontró que el 99 % de los hornos tienen emisiones de partículas con un diámetro menor de 5 µm.

\* mg/Nm<sup>3</sup>: miligramos de contaminante por metro cúbico a condiciones estándar ( 273 °K y 1013 mbar ) y referido a un contenido de oxígeno del 8 %.

En los análisis químicos de las emisiones también se detectaron materiales tóxicos como plomo, selenio, boro, arsénico y vanadio. Las emisiones de estos materiales no fueron encontrados en todos los muestreos, pero fueron detectados en algunos tipos de vidrio donde usaban alguno de los anteriores materiales como parte de la formulación de vidrio.

**TABLA 2**  
**EMISIONES CONTAMINANTES PARA VIDRIO SÓDICO-CÁLCICO [4]**

COMBUSTIBLE	PARTÍCULAS TOTALES kg/h *	SO x kg/h	NO x kg/h
Combustóleo	8.27	18.20	15.70
..	11.50	24.30	22.30
..	4.40	11.30	15.80
..	6.12	23.80	13.60
..	6.60	53.40	12.30
..	15.00	54.10	13.50
Gas Natural	11.98	25.20	48.00
..	9.58	39.20	29.50
..	1.80	0.46	8.90
..	3.40	0.10	10.00
..	40.00	66.20	66.60

En esta tabla no se hace mención de las toneladas de vidrio obtenidas para cada horno ( Estraje Ton/día ) , este factor es importante ya que las emisiones de NOx, SOx y partículas están expresadas en función de la cantidad de vidrio producida. Pero esto no deja de ser un buen ejemplo donde se observa la fusión de vidrio utilizando dos tipos distintos de combustibles comerciales empleados y el tipo de emisiones características para cada caso.

Existe un gran número de factores que influyen en las emisiones de un horno, pero el factor más significativo es el tipo de combustible utilizado en los hornos de fusión para vidrio. En la tabla 2 se puede observar como en los hornos donde se utiliza combustóleo las emisiones de SOx son más significativas que en las que se emplea gas y en los hornos donde se utiliza gas natural las emisiones son más altas en NOx.

\* Para el muestreo se utilizó el método 5-EPA ( Determinación de emisión de partículas de fuentes fijas. Título 40, " Protección Ambiental ", Part. 60, App A, Pág. 387 ).

Las características promedio de los combustibles líquidos y gas natural utilizados en México en los hornos de fundición de vidrio son:

**VALORES PROMEDIO DE LAS CARACTERÍSTICAS  
PRINCIPALES DEL COMBUSTIBLE [5]**

ZONA	VISCOSIDAD SSF A 50 °C	ASFÁLTENOS % PESO	AZUFRE % PESO	SODIO ppm	VANADIO ppm
Valle de México	523.67	18.36	3.76	15.13	237.00
Tula	530.67	18.83	3.79	13.20	267.67
Salamanca	608.66	17.34	3.71	25.80	264.67
Guaymas II	356.78	14.32	3.24	10.38	229.48
Monterrey	534.67	20.32	3.66	26.34	309.59
Manzanillo I	471.72	14.32	2.50	18.57	153.00

**COMPOSICIÓN DE GAS NATURAL [5].**

COMPOSICIÓN	% VOL.
CH <sub>4</sub>	98.80
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0.97
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	0.02
N <sub>2</sub>	0.07
H <sub>2</sub> S	0.10

PCN\* = 917 BTU/pie<sup>3</sup>

Claramente se observa que el combustible tiene composiciones de azufre que provocan emisiones más notorias de SO<sub>x</sub> que de NO<sub>x</sub>. El gas natural por su composición química aporta N<sub>2</sub> y en combinación con el aire como fuente de oxígeno, generan gases de combustión con un 70 % de nitrógeno provocando que las emisiones principales con este combustible sean los NO<sub>x</sub>.

En México las emisiones atmosféricas para varios hornos tipo regenerativos en el año de 1993 de las plantas de vidrio Sódico - Cálcico para envases se muestran en la tabla 3 y en la tabla 4 se muestran resultados de un monitoreo hecho en 1995 de emisiones de NO<sub>x</sub> y partículas de algunos hornos para envases de vidrio.

\*PCN: Poder calorífico neto

**TABLA 3**  
**EMISIONES DE CONTAMINANTES DE HORNO EN MÉXICO EN 1993 [6].**

HORNO	GASTO m <sup>3</sup> /min.	ESTIRAJE Ton/día	NO <sub>x</sub>		PARTICULAS	
			mg/m <sup>3</sup>	kg/Ton	mg/m <sup>3</sup>	kg/Ton
M-1	442	102	802	5.002	78	0.488
M-2	351	125	968	3.941	116	0.472
M-3	444	61	961	10.058	65	0.681
M-4	278	138	2557	7.410	110	0.319
M-5	518	134	658	3.650	99	0.554
Q-1	700	283	641	2.286	83	0.295
Q-2	1019	278	329	1.738	52	0.278
Q-3	948	285	192	0.917	48	0.229
G-1	850	223	413	2.264	92	0.506
G-2	869	153	806	6.589	52	0.430
T-1	571	288	1419	4.350	134	0.412
X-1	605	148	902	5.286	72	0.422
R-1	235	33	513	5.182	54	0.552
R-2	959	170	301	2.443	93	0.760
R-3	719	222	756	3.534	115	0.727
R-4	1082	312	569	2.790	93	0.457
E-1	313	60	1120	8.427	151	1.137
E-2	560	238	754	2.557	165	0.560
E-3	97	30	248	1.156	82	0.382
E-4	327	177	528	1.407	208	0.554



**TABLA 4**  
**EMISIONES DE CONTAMINANTES DE HORNOS EN MÉXICO EN 1995 [7].**

PLANTA	NOx kg./Ton V.F.*	NORMA OFICIAL		PARTICULAS kg./Ton V.F.	NORMA OFICIAL	
		ETAPA 0	ETAPA 1		ETAPA 0	ETAPA 1
M-1	4.02	10	4.8	0.45	2.43	1.25
Q-1	1.97	10	5.8	0.29	2.00	1.09
G-1	1.93	10	4.8	0.37	1.12	0.69
G-3	5.20	10	8.6	0.57	3.88	2.05
T-1	3.93	10	5.8	0.47	1.79	1.09
X-1	1.32	10	4.8	0.20	1.34	0.96
R-0	3.12	10	7.2	0.52	2.18	1.68
R-1	1.37	10	4.0	0.21	1.09	0.67
E-1	2.30	10	4.0	0.52	1.77	1.08

Por ejemplo comparando los resultados de la tabla 3 ( 1993 ) con los de la tabla 4 ( 1995 ) se observa una reducción considerable de emisiones de NOx por tonelada de vidrio fundido. Por ejemplo; para el horno M-1 que en 1993 presentaba un valor de 5.002 kg./Ton de vidrio fundido hay una reducción a 4.02 kg./Ton vidrio fundido, lo que equivale a un 19.6 %.

En el ejemplo anterior los valores de emisiones de 1993 y 1995 están dentro de los límites establecidos para la etapa 0 ( Comprende del 1 Julio al 31 de Diciembre de 1996 ) y la etapa 1 ( inicia el 1 de Enero de 1997 y vence el 30 de junio de 1999 ). Los valores de partículas mostrados en la tabla 4 son estimados pues hay una norma específica para cada horno, en el Capítulo 2 se tratara con mayor detalle el contenido de la norma la NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-097-ECOL-1995.

Esta norma establece los límites máximos permisibles a la atmósfera de material particulado y óxidos de nitrógeno en los procesos de fabricación de vidrio en el país, marca tres etapas de cumplimiento para las emisiones de los contaminantes señalados, donde en cada etapa dependiendo de la zona del país, tipo de horno, vidrio, color del vidrio y tiro, existen reducciones considerables en cada etapa.

En la tabla 5 se resumen los resultados de un monitoreo realizado en diferentes meses en 1995 de emisiones contaminantes de NOx y partículas en el proceso de fabricación de vidrio para varias plantas ubicadas en diferentes estados de México.

El estudio [8] realizado en 1995 por la industria vidriera para la fabricación, de vidrio para envases tenía como objetivo comparar los resultados obtenidos con los niveles máximos permisibles establecidos en la Norma NOM-097-ECOL-1995. Se concluyó que tanto en emisiones de óxidos de nitrógeno y partículas las emisiones de las industrias monitoriadas se encuentran muy por debajo del límite máximo permisible de la etapa 0, que es la vigente en este caso.

\*V.F. : Vidrio fundido

**TABLA 5**

**ESTUDIO EN 1985 DE EMISIONES DE OXIDO DE NITRÓGENO Y PARTICULAS DE PLANTAS DE FABRICACIÓN DE VIDRIO PARA ENVASES EN MÉXICO [8]**

PLANTA	ÓXIDOS DE NITRÓGENO kg./Ton V.F.				PARTICULAS kg./Ton V.F.	
	FEB.	MAY.	AGO.	NOV.	MAY.	NOV.
M	4.47	4.02	3.76	4.08	0.44	0.34
R	3.57	2.59	3.57	3.00	0.43	0.45
E	2.35	2.30	2.74	1.93	0.54	0.92
Q	1.80	1.97	2.09	1.77	0.30	0.31
G	3.19	3.33	4.22	3.19	0.49	0.40

El monitoreo hecho a las plantas en diferentes meses de emisiones contaminantes muestran una estabilidad considerable para cada planta de sus emisiones lo cual habla de un buen control de emisiones contaminantes. Las variaciones que se observan se deben a la variación del estraje de cada horno.

**1.1. FORMACIÓN DE SOx**

El azufre se encuentra en la atmósfera en forma gaseosa como SO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>S especies que con carácter general intervienen en el ciclo del azufre. Como se sabe los combustibles fósiles contienen cantidades significativas de azufre produciendo en forma directa SO<sub>2</sub>.

La composición química típica del combustible tiene en promedio 3 % de azufre que produce 3700 mg/Nm<sup>3</sup> de SO<sub>2</sub> y los gases del combustible contienen 0.9 % de azufre que producen 1100 mg/Nm<sup>3</sup> de SO<sub>2</sub> ( los valores obtenidos son referidos a 8 % en volumen de O<sub>2</sub> en base seca ). El gas natural virtualmente no contiene azufre y por lo tanto no contribuye directamente en la generación de SO<sub>x</sub>.

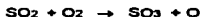
El azufre en forma gaseosa es conducido muy rápidamente a la atmósfera, pero en estado oxidado el transporte queda restringido al sulfato sólido o a las neblinas de ácido sulfúrico.

En la ZMCM ( zona metropolitana de la ciudad de México), PEMEX con el fin de disminuir los niveles de emisiones contaminantes de SO<sub>x</sub> sustituyó el uso de: combustible por el Gasóleo Industrial [9], que es la combinación de:

DIESEL DESULFURADO	40 %
ACEITE CÍCLICO LIGERO	35 %
ACEITE DECANTADO	25 %

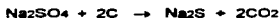
Lo importante del nuevo combustible es que el combustíleo de un 3 % promedio, disminuye a una concentración de 1.5 a 2 % de azufre, lo cual también disminuye a la mitad en muchos casos las emisiones de SOx.

La disociación fotoquímica del SO<sub>2</sub> no es posible en las condiciones atmosféricas ya que se requiere 565 KJ mol<sup>-1</sup>, valor que no se alcanza mediante absorción de radiación solar. La siguiente reacción es la más importante para la producción de SO<sub>3</sub> y aunque su naturaleza exacta no está clara, los investigadores la proponen como la más probable.



Otra fuente de SOx en la industria vidriera es por el sulfato presente en la carga y el SO<sub>2</sub> de la pedeceria de vidrio [10], esta aportación es muy pequeña pero importante ya que la solubilidad del SO<sub>3</sub> total en el vidrio producido esta en función con el estado de oxidación de vidrio. Este efecto en el estado de oxidación influye en la coloración del vidrio.

El SO<sub>2</sub> es generado por la carga por las reacciones siguientes:



La cantidad de SO<sub>2</sub> generada por este medio depende del estado de oxidación del vidrio y las toneladas de vidrio producidas por el horno. Cuando se usa combustíleo para fundir vidrio, las emisiones de SO<sub>2</sub> se encuentran entre 1500 a 2000 mg/Nm<sup>3</sup>.

Si la composición química de azufre en el combustible es baja como sucede con el gas natural, las emisiones de SO<sub>2</sub> son generadas principalmente por la carga al reaccionar el Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> con el carbón, las emisiones son del orden de 500 mg/Nm<sup>3</sup> de SO<sub>2</sub> aproximadamente. La aportación de SO<sub>2</sub> por el gas natural son de residuos.

## 1.2. FORMACIÓN DE NOx

Las altas temperaturas de fundición ( 1200 a 1500 °C ) en los hornos de vidrio y la oxidación del nitrógeno del combustible, genera NOx.

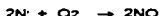
A altas temperaturas se lleva a cabo la siguiente reacción:



A bajas temperaturas se tiene:



En los hornos de fusión de vidrio, de las emisiones de NOx generados, del 90 al 95 % lo aportan los NO. El nitrógeno del combustible reacciona con el oxígeno para producir los NOx provenientes del combustible, de la siguiente forma:



El radical libre del nitrógeno en el combustible reacciona para convertirse totalmente en NOx . El combustible contiene 2500 ppm de nitrógeno las cual producen 1500 mg/Nm<sup>3</sup> de NOx .

La formación de NOx se debe principalmente por las temperaturas altas de la flama de los quemadores, la concentración de nitrógeno, oxígeno y el tiempo de residencia prolongado en la zona de alta temperatura ( 1550 °C ). En la figura 1 se muestran los efectos de la temperatura sobre los NOx en condiciones de equilibrio para una concentración de oxígeno del 2 % observándose un rápido incremento de los NOx a temperaturas mayores.

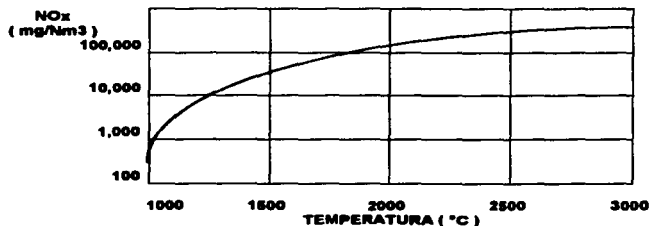


FIGURA 1 : Efecto de la Temperatura Sobre los NOx [10].

En la figura 2 se muestran los efectos del exceso de oxígeno sobre la concentración de NOx en equilibrio a 1500 y 2000 °C. Se observa, que al reducir el exceso de oxígeno y trabajar con temperaturas de fusión bajas en los hornos para vidrio las emisiones de NOx se reducen considerablemente.

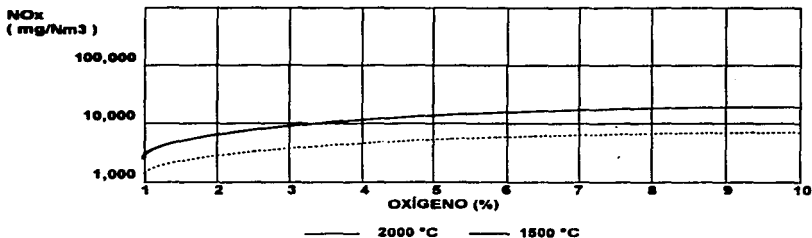


FIGURA 2 : Efecto del Oxígeno Sobre los Nox [10].

### 1.3. FORMACIÓN DE PARTÍCULAS

La emisión de partículas se deriva de la volatilización de ácidos de las materias primas que conforman la carga y cenizas del combustible. Un análisis químico típico de partículas emitidas al utilizar gas natural y combustóleo en la fundición de vidrio es el siguiente:

COMPONENTE	%
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	90
CaSO <sub>4</sub>	5
SiO <sub>2</sub>	1
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	2
OTROS	2

De los componentes anteriores el Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> es el de mayor proporción y es originado directamente de la volatilización de los materiales de la carga. El CaSO<sub>4</sub> y SiO<sub>2</sub> son originados por la segregación de la carga, durante su alimentación en el horno por la alta velocidad del flujo de gases, generados por el aire de combustión y quemadores.

La adición de agua a la carga puede disminuir considerablemente la segregación de los componentes, se recomienda manejar un 2 % de humedad en la carga. El V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> proviene del combustóleo y este compuesto generalmente no se hace presente cuando se utiliza gas natural en los hornos de fusión de vidrio. La formación de partículas depende de la temperatura del horno, estiraje y área de fundición. Esta relación es ilustrada en la figura 3.

**PARTÍCULAS**  
( mg/Nm<sup>3</sup> )

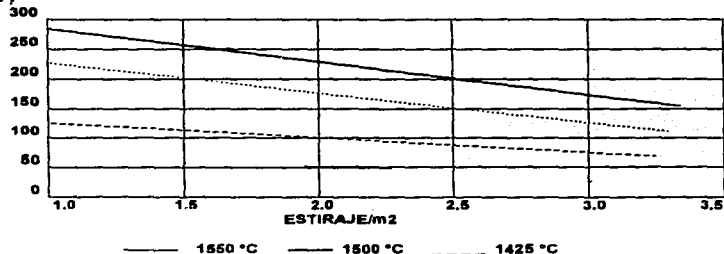


FIGURA 3 : Efecto del Estiraje y Temperatura sobre las Emisiones de Partículas [10].



**MARCO JURÍDICO ECOLÓGICO  
EN LA INDUSTRIA DEL VIDRIO**

## CAPITULO II

### MARCO JURÍDICO ECOLÓGICO EN LA INDUSTRIA DEL VIDRIO

La capacidad del hombre para normar y alterar el medio en que se sustenta se ha manifestado a lo largo de la historia; sin embargo, en el presente siglo, sobre todo en décadas recientes se han venido acumulando signos que, a ritmo acelerado ponen en evidencia la gravedad del deterioro ambiental que se asocia a las formas de progreso relacionados con la industrialización, el desarrollo económico urbano y las transformaciones de la energía en nuestra biosfera.

En virtud de lo anterior, ha surgido la necesidad de condicionar las conductas individuales y sociales para evitar aquellas que produzcan efectos negativos al ambiente; sobre esta base se construyen legislaciones ambientales en todo el mundo para prevenir y controlar la contaminación ambiental.

Cualquier actividad industrial produce desechos; al investigar, desarrollar, producir y transportar, existen riesgos ambientales que toda la industria, consciente de su responsabilidad con la sociedad a la que pertenece, debe evaluar a priori y evitar estos riesgos, manteniendo un equilibrio entre sus objetivos económicos y su responsabilidad ética.

La producción de productos de vidrio se ha incrementado notoriamente en los últimos años, por lo que las emisiones de las chimeneas de sus hornos también se han incrementado. Muchos países han tenido que establecer límites de emisiones de los principales contaminantes para proteger el medio ambiente de sus ciudades. Aunque se sabe que países como E.U.A. cuentan con las leyes ambientales más estrictas del mundo, en la actualidad la ley federal de E.U.A. no especifica los niveles de emisiones de NOx por diferentes fuentes para la industria del vidrio.

En recientes años las cantidades de emisiones contaminantes a la atmósfera han tenido que ser restringidas por legislaciones, como se muestra en la tabla 6. Sus límites y formas de aplicación varían de país a país y por ejemplo en E.U.A. inclusive de estado a estado.

**TABLA 6**  
**LIMITES DE EMISIONES CONTAMINANTES EN E.U.A. , ALEMANIA Y JAPÓN [10].**

PAIS	SOx	NOx	PARTICULAS
<b>E. U. A.</b>			
ACTUAL	-	4.0 lb/Ton vidrio fundido	0.2 - 1.0 lb/Ton de vidrio fundido y 50 µg/m3.
FUTURO	1.2 lb/ MBTU	0.5 lb/MBTU	0.2 lb/Ton de vidrio fundido y 50 µg/m3.
<b>ALEMANIA</b>			
ACTUAL *	1.8 g/Nm3	2.2 - 3.5 g/Nm3	50 mg/Nm3
FUTURO *	250 mg/Nm3	150 mg/Nm3	50 mg/Nm3
<b>JAPÓN</b>			
ACTUAL	-	360 - 450 ppm con 15% O2	-

\* Las concentraciones fueron estandarizadas a 8 % en volumen de O2 y base seca.

En E.U.A. para el estado de California se cuenta con las leyes más estrictas a nivel mundial para la industria del vidrio. La ley estatal en California actualmente prescribe que como límite de emisiones de NOx en 1992, los hornos para vidrio deben de tener emisiones límites de NOx de 4.0 lb/Tonelada de vidrio fundido, reduciéndose paulatinamente estas emisiones hasta alcanzar para el año 2000 un máximo de emisiones de 2.0 lb/Tonelada de vidrio fundido.

La Comunidad Europea ( CE ) ha establecido límites de emisiones para SO<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub>, en base a las leyes modelo alemanas:

1. Protección de Emisiones ( 1974 )
2. Regulación en Hornos Grandes ( 1983 )
3. Fuentes de Emisiones para Combustibles Sólidos y Líquidos en Hornos de Fusión de Vidrio ( 1985 ).

Para la mayoría de países europeos los límites máximos de emisiones contaminantes se basan en las legislaciones TA Luft de Alemania. En Austria, Holanda, Suiza y países Escandinavos también se han establecido estrictos límites de emisión . Italia ha reducido las emisiones de SO<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub> hasta un 30 % en pocos años en sus plantas de vidrio utilizando combustóleo, en base a programas y sistemas de control de emisiones contaminantes.

Los trabajos de " TA Luft " ( Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft ), que es la Dirección Técnica del Comportamiento del Aire Limpio y de la agencia LRV ( Luft Rein Halte Verordnung ), han establecido que existen aproximadamente 150 sustancias contaminantes por la industria del vidrio, peroafortunadamente únicamente 12 son relevantes. Algunas sustancias son mostrados en la tabla 7 y 8 .

La agencia LRV por decreto es la que se encarga de vigilar el comportamiento del aire en Alemania. A cada distrito se le encarga hacer cumplir las legislaciones ambientales por medio de oficinas de inspección de fábricas y supervisores de distrito.

Los valores mostrados en la tabla 7, 8 y 9 son un resumen de legislaciones ambientales de países productores de vidrio. Este resumen fue elaborado y publicado por la Comisión de Producción y Ambiente de la Federación Europea de Envases de Vidrio ( FEVE ) en representación de los países que integran la Comunidad Económica Europea ( CE ) y la Europea Free Trade Association o sea la Asociación Europea de Libre Comercio ( EFTA ) [11]. Los valores reportados para E.U.A. fueron aportados por Ball-in-Company y los de Japón por Toyo Glass Co. Ltd.

Las legislaciones límites de emisiones contaminantes introducidas en los países de la CE y EFTA son las legislaciones de TA Luft en Alemania TA Luft y LRV no limitan las emisiones contaminantes por tipo de vidrio fundido, en el caso de Francia se tomaron las legislaciones TA Luft para aplicarla en vidrios especiales y excluye los límites de SO<sub>x</sub> y NO<sub>x</sub>, pero en Francia se empezaron a realizar legislaciones que distinguen entre vidrios sódico-calizo y vidrios especiales. Esto es importante por que dependiendo del tipo de vidrio se vigilan los contaminantes a la atmósfera.

Hay que señalar que las emisiones de HF y HCl en la industria vidriera en Europa frecuentemente exceden los límites de las legislaciones de TA Luft. En el caso de Italia y en especial de Inglaterra se han emitido legislaciones estrictas para poder obtener una reducción de los anteriores contaminantes y de emisiones de NO<sub>x</sub> , de tal manera que las industrias puedan seguir operando en zonas urbanas. Apesar de que estos países cuentan con una tecnología de punta en la industria vidriera se espera que se observen resultados satisfactorios en un periodo de 5 a 10 años.

Las emisiones límites en E.U.A. y Japón son rigurosas y en algunos de sus estados exceden los valores límites de las legislaciones de TA Luft . En Japón las legislaciones se aplican por igual forma en áreas rurales.



TABLA 7

LIMITES DE EMISIONES EN ALGUNOS PAÍSES DE LA CEY EFTA PARA HORNOS DE VIDRIO

Legislación Nuevas Plantas	Cenizas	SOx	NOx	HF	HCl	Cd	Se	Ni	Co	V	Cr	Pb
		Calculado como SO <sub>2</sub>	Calculado como NO <sub>2</sub>			C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>5</sub>	C <sub>6</sub>	C <sub>7</sub>
EMISIONES	Horno Recuperativo 100 a 200 mg/m <sup>3</sup> Horno Regenerativo 150 a 250 mg/m <sup>3</sup>	De 1000 a 4000 mg/m <sup>3</sup> dependiendo del azufre en Carga y Combustible.	Horno Recuperativo 400 a 700 mg/m <sup>3</sup> Horno Regenerativo 100 a 4000 mg/m <sup>3</sup>	5	30							
ALEMANIA	Legislación TA Luft es válida.	50 mg/m <sup>3</sup>	1800 mg/m <sup>3</sup>	5	30	0.2	1	1	1	5	5	5
			1200 a 3500 mg/m <sup>3</sup> dependiendo del tipo de horno y combustión.			ΣC <sub>1</sub> ≤ 0.2	← ΣC <sub>2</sub>	s1	→	←	Σ C <sub>3</sub> ≤ 5	→
SUIZA	Primera etapa LRV es válida. Valor promedio 5028 Kj / kg (v).	0.4 kg / Ton (v). ( = 200 mg/m <sup>3</sup> a 8% volumen de O <sub>2</sub> ).	500 mg/m <sup>3</sup> de proceso más SO <sub>x</sub> originado por 1 % En combustible ( = 1800 mg/m <sup>3</sup> a 8% volumen O <sub>2</sub> ).	5	30	0.2	1	1	1	5	5	5
			6.5 kg/Ton de vidrio. (=3000 mg/m <sup>3</sup> a 8% volumen O <sub>2</sub> ).			← ΣC	+C	s1	→	← ΣC <sub>3</sub>	< 5	→
						←→		ΣC <sub>2</sub>	+	← ΣC <sub>2</sub>	≤ 5	→
SUECIA		De 10 a 250 mg/m <sup>3</sup> a 10% de volumen O <sub>2</sub> .	2 kg/Ton de vidrio. (=1000 mg/m <sup>3</sup> a 8% volumen de O <sub>2</sub> ).	2.5 kg/Ton de vidrio. (=1500 mg/m <sup>3</sup> a 8% volumen de O <sub>2</sub> ).	←			θ <sup>a</sup>				→
FRANCIA	Vidros Especiales Vidrio Sódico-Cálcico	50 mg/m <sup>3</sup>	←	Ninguno	→	←		TA Luft				→
AUSTRIA	Sur de Austria Norte Austria	←	←	Ninguno				TA Luft				→
ESPAÑA		150 mg/m <sup>3</sup>	←	Ninguno				Ninguno				→
DINAMARCA	Únicamente con Chimenea alta.	←	←	Ninguno				Ninguno				→
HOLANDA	Únicamente con contenido de azufre del 1% en el combustible.	←	←	Ninguno				Ninguno				→
BELGICA												
INGLATERRA												
IRLANDA		←		Ninguno								→
ITALIA												
FINLANDIA												

Estos datos son de hornos recuperativos y regenerativos con capacidad mayor a 50 toneladas por día. Las unidades de todos los valores en la tabla son referidos en mg de contaminantes por m<sup>3</sup> de base seca a condiciones estándar ( 273 ° K y 1013 mbar ) y 8% volumen de O<sub>2</sub>. C<sub>1</sub>( 1,2,3 ) = Tipo de contaminante. ( V ) = Vidrio.

<sup>a</sup>θ 0.03 a 30 toneladas de HF por año dependiendo del tamaño de la planta y localización.

TABLA 8

LIMITES DE EMISIONES EN E.U.A. Y JAPON PARA HORNOS DE VIDRIO

Legislación Nuevas Plantas	Cenizas	Sb Calculado como SO <sub>2</sub>	Nb Calculado como NO <sub>2</sub>	Fluor HF	Cloro HCl	Cadmio Cd	Piomo Pb	Antimonio Sb
E. Nuevas Fuentes. Funcionamiento estándar de 40 CFR 60.	0.20 lb/U.S Ton. vidrio usando gas en horno.	500 ppmv en California Acordado por: SCAQM (South Coast Air Quality Management).	4.0 lb/U.S Ton. Vidrio en California. Acordado por: SCAQM (= 2.0 kg/Ton de vidrio)	Estándar	únicamente	arsénico ( = 60 kg/año )	inorgánico:	
U. Partículas solamente	0.26 lb/U.S Ton. vidrio usando Combustión en el horno. ( = 40 mg/m <sup>3</sup> a 8 % de volumen de O <sub>2</sub> ).	( = 1430 mg /m <sup>3</sup> a 8 % de volumen de O <sub>2</sub> ).						
A. Estándares de Gobierno.	50 mg/m <sup>3</sup> para homos con > 40,000 m <sup>3</sup> /h. 100 mg/m <sup>3</sup> para homos < 40,000 m <sup>3</sup> /h.		450 ppm ( Refenido para un contenido de O <sub>2</sub> a 8 % de volumen de O <sub>2</sub> ). = 1000 ppm "e" = 2000 mg/m <sup>3</sup>	10*	-	1*	20*	-
P. Regulaciones Locales:								
O a.- Valores Máximos	200 mg/ m <sup>3</sup>	53.1 m <sup>3</sup> /h ( Tot. de cantidad reglamentada ).	500 ppm ( Densidad reglamentada ).	10*	80*	1*	20*	-
N b.- Valores Mínimos	28 mg/m <sup>3</sup>	1.9 m <sup>3</sup> /h ( Tot. de cantidad reglamentada ).	700 ppm ( Densidad reglamentada ).	2.5*	8*	0.5*	6*	50*

Estos datos son de hornos con una capacidad mayor a 50 toneladas por día. Todos los valores son referidos a flujo de gas seco en condiciones estándar ( 273 °C y 1013 mbar ) con contenido de O<sub>2</sub> de 8 % para USA y 15 % para Japón.

\* Los valores son expresados en mg/m<sup>3</sup> base seca y 15 % de volumen de O<sub>2</sub>.

50 mg/m<sup>3</sup> a 15 % O<sub>2</sub> corresponde a 108 mg/m<sup>3</sup> a 8 % O<sub>2</sub>.

NOTA: Las unidades para HF, HCl, Cd, Pb y Sb están dadas en mg/m<sup>3</sup> base seca y 15 % de volumen de O<sub>2</sub>.

TABLA 9

TENDENCIAS Y LEGISLACIONES DE LÍMITES DE EMISIONES EN E.U.A., JAPÓN Y PAÍSES DE LA CE Y EFTA

PAIS	TENDENCIAS	LEGISLACIONES PARA LAS PLANTAS DE VIDRIO EXISTENTES
ALEMANIA	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. En cenizas y SO<sub>x</sub> reducir niveles de emisión en el futuro porque es técnicamente posible.</li> <li>2. Nuevas legislaciones sobre emisiones de NO<sub>x</sub>.</li> </ol>	La necesidad de establecer nuevos límites de emisiones para nuevas plantas de vidrio, en un intervalo de tiempo de 3 a 8 años dependiendo del tipo de planta. Cumplir los niveles de emisiones peligrosas y saber cuantas plantas nuevas cumplen los límites de emisiones establecidos ( Ver tabla 7 ).
SUIZA	<p>Acercarse a la segunda etapa: En un futuro reducir emisiones inferiores a los límites establecidos.</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Es técnicamente y económicamente factible.</li> <li>2. Dar paso a valores menores de emisiones nunca obtenidos</li> </ol>	<p>Dar pasos prudentes para acercarse a obtener valores de emisiones mostrados en la tabla 7.</p> <p>Poco a poco tratar de acercarse a obtener bajos niveles de emisiones, dependiendo del tamaño de la planta y su localización.</p>
SUECIA	Ninguna	
FRANCIA	Realizar legislaciones y establecer límites para vidrio Sódico-Cálcico en 1992.	Ninguna
AUSTRIA	Se necesita que el 70 % se encuentren en el " Bundestag " para introducir legislaciones a nivel federal.	No hay reporte
BELGICA	TA Luft se tomara como base cuando establezcan más estrictos límites para cenizas.	Ninguna
DINAMARCA	TA Luft se toma como base cuando se hagan más estrictos los límites para cenizas.	Ninguna
HOLANDA	En el futuro se tomará TA Luft para establecer límites de emisiones más severas.	Ninguna
INGLATERRA	<p>Acordar con la industria del vidrio dos etapas para:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Aproximarse a los límites de TA Luft en 10 años.</li> <li>2. Hacer que las autoridades confirmen la legislación.</li> </ol>	
ESPAÑA	Más legislaciones deben ser introducidas.	Ninguna
FINLANDIA		
ITALIA	Introducir TA Luft en 1993	Ninguna
E.U.A.	<p>LOCAL: Regulaciones que se alcanzen primero en áreas metropolitanas que estén fuera de complicaciones con estándares de calidad del medio ambiente y servir como blanco de contaminantes específicos.</p> <p>FEDERAL: Cambios a la acta de aire limpio actual bajo una discusión en el congreso para reducir los límites de NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> y elementos tóxicos, dependiendo de la tecnología y cuestiones económicas disponibles.</p>	Límites de NO <sub>x</sub> : 4.0 lb/U.S vidrio ( = 2.0 kg/Ton (V) )
JAPÓN	Estándar Gubernamental: Límites de emisión en mg/m <sup>3</sup> base seca y 18 % en volumen de O <sub>2</sub> .	100 mg cenizas/m <sup>3</sup> base seca y 18 % en volumen de O <sub>2</sub> . Para nuevas plantas en valores de HF, HCl, Cd , Y y Sb cumplir los límites establecidos en la tabla 8.

La legislación ambiental en México que regula la apropiación y el uso de los recursos naturales del país, así como la protección del medio ambiente, se inició en 1917, cuando se sustentó en forma legal la protección de los recursos naturales en México. Así en el tercer párrafo del artículo 27 de nuestra carta magna quedó consagrado el derecho que tiene la nación de imponer a la propiedad privada las modalidades que dicte el interés público para lograr el desarrollo equilibrado del país.

En lo que se refiere a la legislación ambiental, se inicia a partir de 1971 como motivo de la ley federal para prevenir y controlar la contaminación ambiental. Sin embargo, se debe destacar que este ordenamiento abordó únicamente los fenómenos de contaminación de agua, aire y suelo considiéndose a la problemática ambiental sólo como un problema de salud pública.

En 1982, se publicó la ley federal de protección al ambiente; en esta ley aparecen por primera vez, aunque en forma precaria, las medidas preventivas orientadas a la protección integral del ambiente. En 1917, para fortalecer las bases constitucionales en la materia, se reformaron los artículos 27 y 73 de nuestra carta magna, elevando al más alto rango una de las principales preocupaciones de la sociedad e involucrando las tres instancias de gobierno: Federal, Estatal y Municipal.

Bajo esta concepción, se expide en 1988 la ley general del equilibrio ecológico y la protección del medio ambiente, donde este nuevo ordenamiento sustenta el principio de que la prevención es el medio más eficaz para preservar el equilibrio de los ecosistemas ecológicos; fortalece los mecanismos de control a fin de reducir o corregir el deterioro ambiental. Define los campos de atribuciones de las entidades concurrentes y establece como instrumento de la política ecológica, el ordenamiento ecológico, el impacto y riesgo ambiental y las normas técnicas ecológicas para el control de la contaminación atmosférica.

- NTE-CCAT-007/88** Niveles máximos permisibles de emisión a la atmósfera de partículas, monóxido de carbono, dióxido de azufre y óxidos de nitrógeno, provenientes de procesos de combustión de combustibles en fuentes fijas.
- NTE-CCAT-008/88** Niveles máximos permisibles de emisión a la atmósfera de partículas, monóxido de carbono, dióxido de azufre y óxidos de nitrógeno, provenientes de procesos de combustión de gas natural en fuentes fijas.
- NTE-CCAT-009/88** Niveles máximos permisibles de emisión a la atmósfera de partículas sólidas provenientes de fuentes fijas.

Donde:

- NTE = Norma Técnica Ecológica  
CCAT = Control de la Contaminación Atmosférica  
008 = Número de Documento  
88 = Año de Emisión

Existe la Norma Oficial Mexicana NOM-065-ECOL-1994, que establece los niveles máximos permisibles de emisión a la atmósfera de partículas, monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno, dióxido de azufre, neblina de ácido sulfúrico y partículas suspendidas, así como los requisitos y condiciones para la operación de los equipos de calentamiento indirecto por combustión y emisiones de dióxido de azufre en los equipos de calentamiento directo por combustión utilizados en fuentes fijas, que usan combustibles fósiles líquidos o gaseosos o cualquiera de sus combinaciones.

Estos reglamentos son para procesos de combustión en general y no establecen límites específicos para la Industria del Vidrio. En 1993 se realizó un proyecto de Norma Oficial Mexicana que estable los límites máximos de emisiones a la atmósfera, en esta elaboración participan organismos e instituciones como la Secretaría de Desarrollo Social, la Secretaría de Salud, la Secretaría de Comercio y Fomento Industrial y la Industria del Vidrio [12].

Considerando que en las actividades de fabricación de vidrio en los procesos industriales del país se generan emisiones importantes de partículas y óxidos de nitrógeno, los cuales son precursores de compuestos secundarios como el ozono, que tiene un impacto sobre la calidad del aire cuando se rebasan los criterios de calidad establecidos y considerando que por la localización de las industrias vidrieras del país se expide la norma con el objeto de contribuir a la reducción de las emisiones de contaminantes en la atmósfera, el gobierno con conocimiento de las Secretarías Sociales la nombra:

#### **NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-SEDESOL-CCAT-/93.**

Este proyecto de norma establece los límites máximos permisibles de emisiones a la atmósfera de material particulado y óxidos de nitrógeno en los procesos de fabricación de vidrio en el país y este proyecto de norma es de observancia obligatoria para las Industrias Vidrieras y aplica exclusivamente a los hornos de fusión donde por medio de la acción del calor se funden diferentes materias primas para obtener varios tipos de vidrio. Los hornos de vidrio deben tener una capacidad superior a 5 Ton/día.

El proyecto de norma no es aplicable a procesos de recalentamiento del vidrio, hornos artesanales, hornos de pintado y decorado de vidrio y a ningún horno de fusión que utiliza para la fusión 100 % de energía eléctrica.

Para la elaboración del Proyecto de Norma se utilizaron como referencia las siguientes normas:

<b>NMX-AA-009</b>	Determinación del flujo de gases en un conducto por medio del tubo pitot. Localización de puertos y plataformas de muestreo, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 27 de Diciembre de 1993.
<b>NMX-AA-10</b>	Determinación de la emisión de partículas sólidas contenidas en los gases que se descargan por un conducto. Publicada en el Diario Oficial de la Federación el 16 de Mayo de 1974.
<b>NMX-AA-23</b>	Protección al ambiente - contaminación - atmosférica - terminología. Publicada en el Diario Oficial de la Federación el 15 de Julio de 1986.
<b>NMX-AA-54</b>	Determinación del contenido de humedad en los gases que fluyen por un conducto ( método gravimétrico ), publicada en el Diario Oficial de la Federación el 2 de Agosto de 1978.
<b>NMX-AA-35</b>	Determinación de dióxido de carbón, monóxido de carbono y oxígeno en los gases de combustión, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 10 de Junio de 1976.
<b>MÉTODO 7E-EPA-1989</b>	Determinación de emisiones de óxidos de nitrógeno para fuentes estacionarias ( procedimiento de muestreo ).

Para los efectos de este Proyecto de Norma Oficial Mexicana, se consideran zonas críticas por las altas concentraciones de contaminantes de la atmósfera las zonas metropolitanas de la Ciudad de México, Monterrey, Guadaluajara, los centros de población de Coatzacoalcos - Minatitlán, en el Estado de Veracruz; Irapuato - Celaya - Salamanca, en el Estado de Guanajuato; Tula - Vito - Apasco, en el Estado de Hidalgo; corredor industrial de Tampico - Madero - Altamirano; en el Estado de Tamaulipas, y la zona fronteriza norte. Las emisiones de óxidos de nitrógeno a cumplir en la NOM-SEDESOL-CCAT-/93, se muestran en la tabla 10 y 12. Las etapas de cumplimiento para las emisiones de óxidos de nitrógeno y material particulado serán:

1ª Etapa	18 Meses después de entrada en vigor
2ª Etapa	48 Meses después de entrada en vigor
3ª Etapa	96 Meses después de entrada en vigor

TABLA 10

EMISIONES DE ÓXIDO DE NITRÓGENO EXPRESADAS EN kg./Ton DE VIDRIO FUNDIDO.

HORNOS EXISTENTES			EMISIÓN MÁXIMA PERMISIBLE DE ÓXIDOS DE NITRÓGENO ( kg. / Ton (v) )								
ESPECIALIDAD	TECNOLOGÍA	TIRO	ZONAS CRÍTICAS						RESTO DEL PAÍS		
			ZMCM			OTRAS			1°	2°	3°
			1°	2°	3°	1°	2°	3°			
ENVASE	REGENERATIVO	CHIMENEA	4.0	3.4	2.0	4.8	4.0	2.4	5.8	4.8	2.9
	RECUPERATIVO	MORGAN CHIMENEA	7.2	6.0	3.8	8.6	7.2	4.3	8.6	7.2	4.3
PLANO	REGENERATIVO COLOR CLARO	CHIMENEA	10.8	9.0	6.5	11.6	9.7	7.0	11.6	9.7	7.0
		CHIMENEA	7.8	6.5	5.5	2.5	7.0	5.5	8.4	7.0	5.5
CRISTAL CALIZO OPALINO Y PLOMO	U. MELTER	CHIMENEA	4.8	4.0	2.4	5.8	4.8	2.9	6.0	5.0	3.0
	REGENERATIVO	CHIMENEA	7.2	6.0	3.0	8.6	7.2	4.0	9.0	7.5	4.5
BOROSILICATO	REGENERATIVO	CHIMENEA	15.0	10.0	5.0	30.0	27.0	10.0	33.0	30.0	12.0
FIBRAS	CUALQUIERA	CHIMENEA	8.0	7.0	4.0	8.5	8.0	4.2	8.5	8.0	4.2

HORNOS NUEVOS O RECONSTRUIDOS

ENVASE	2.0	2.4	2.9
PLANO DE COLOR	6.5	6.5	6.5
PLANO CLARO	5.5	5.5	5.5
CRISTAL	3.0	4.0	4.0
BOROSILICATO	5.0	5.0	10.0
FIBRAS	4.0	4.0	4.0

Durante los primeros 18 mese después de publicada la presente norma, ningún horno de fusión de vidrio deberá rebasar los límites de emisión indicados en la tabla 11.

**TABLA 11**  
**LIMITES DE EMISIÓN MÁXIMA DURANTE LOS 18 PRIMEROS MESES**  
**DE ENTRADA LA NORMA EN VIGOR**

ESPECIALIDAD	EMISIÓN MÁXIMA PERMISIBLE DE ÓXIDOS DE NITRÓGENO EN kg/Ton V.F.
Vidrio Envases	10.0
Vidrio Plano	13.0
Vidrio Cristal Calizo, Opalino y Plomo	11.0
Borosilicato	35.0
Fibra	10.0

En el proyecto de norma se especifica que cuando un mismo propietario tenga más de un horno en un mismo predio, el valor a comparar con la tabla 10 será el valor ponderado de acuerdo a la ecuación 1, cuando se trate de hornos de igual tecnología y especialidad.

$$E_p = \frac{\sum_{i=1}^n (E_i \times W_i)}{\sum_{i=1}^n W_i} \quad (1)$$

Donde:

- E<sub>p</sub> = Emisión ponderada en kilogramos por tonelada de vidrio fundido.
- W = Producción correspondiente a cada horno en toneladas por día de vidrio fundido.
- E = Emisión correspondiente a cada horno en kilogramos por toneladas de vidrio fundido, calculada según ecuación 3.
- i = Subíndice que indica el número de horno.
- n = Número de hornos considerados.

Quando el mismo propietario tenga más de un horno en un mismo predio, el valor máximo permisible, será el resultante de la ponderación de los valores de la tabla 10 o 12 según corresponda a la tecnología de hornos considerados. La emisión a comparar con el resultado de la ecuación 2, podrá ser calculada con la ecuación 1.

$$E_{max} = \frac{\sum_{i=1}^n (E_{mi} \times W_i)}{\sum_{i=1}^n W_i} \quad (2)$$

Donde:

**E<sub>max</sub>** = Emisión ponderada en kilogramos por tonelada de vidrio fundido.

**E<sub>mi</sub>** = Emisión permisible al homo correspondiente, tomado de las tablas 11 y 12, expresadas en kilogramo por tonelada de vidrio fundido.

**W<sub>i</sub>** = Producción correspondiente a cada homo considerado, en toneladas por día de vidrio fundido.

**i** = Subíndice que indica el número de homo.

**n** = Número de hornos considerados.

La emisión de óxidos de nitrógeno en cada homo deberá ser calculada con la ecuación 3.

$$E = (0.00271) \frac{Q \times N}{W} \quad (3)$$

Donde:

**Q** = Flujo de gases medido en chimenea, referido a condiciones de 298 °K (25 °C), 760 mmHg y base seca, expresado en m<sup>3</sup>/min.

**N** = Concentración de óxidos de nitrógeno expresados en PPMV (Partes por millón en volumen) como NO<sub>2</sub>, base seca a 760 mmHg, 298 °K.

**W** = Producción del homo correspondiente en toneladas por día de vidrio fundido.

La emisión máxima permisible de partículas en hornos de fusión de vidrio será lo obtenido en la ecuación 4:

$$P = \frac{K1 \times Q^{0.58}}{W} \quad (4)$$

Donde:

**P** = Emisión permisible de partículas en kilogramos por toneladas de vidrio fundido.

**Q** = Flujo de gases medido en la chimenea expresado en m<sup>3</sup>/min. Y referido a condiciones de 298 °K 760 mmHg y base seca.

**K1** = Constante cuyos valores se indican en la tabla 12.



**TABLA 12**  
**CONSTANTE K1 VIDRIOS DESPUÉS DE 18 MESES**  
**DE ENTRADA LA NORMA EN VIGOR**

ETAPA	ZMCM	OTRAS ZONAS CRÍTICAS	ZONAS RESTO DEL PAÍS
1°	4.35	5.20	6.52
2°	4.00	4.70	5.90
3°	2.20	3.10	4.58
Hornos Nuevos o Reconstruido	2.20	3.10	3.10

Durante los primeros 18 meses de vigencia de la norma, ningún horno podrá rebasar los límites calculados con los valores de factor K1 indicados en la tabla 13.

**TABLA 13**  
**CONSTANTE K1 VIDRIOS PRIMEROS 18 MESES**  
**DE ENTRADA LA NORMA EN VIGOR**

ZONA	FACTOR K1
Z MCM	70
OTRAS ZONAS CRÍTICAS	85
ZONAS RESTO DEL PAÍS	120

Las emisiones de partículas a comparar deberán ser calculadas conforme la ecuación 5:

$$P_m = \frac{(0.00144 Q \times C)}{W} - K_2 \quad (5)$$

Donde:

P = Emisiones de partículas medido en kg/Ton de vidrio fundido.

Q = El flujo de gases medido en la chimenea, expresado en m<sup>3</sup>/min. y referido a condiciones de 298 °K ( 25 ° C ), 760 mmHg ( 101325 Pascal ) y base seca.

C = Concentración de partículas medida en la chimenea, isocinéticamente, expresada en mg/ m<sup>3</sup> a 25 ° C, 760 mmHg y base seca.

K2 = constante cuyo valor depende de la especialidad del vidrio, como se muestra a continuación en la tabla 14:

**TABLA 14**

**CONSTANTE K2 PARA DIFERENTES ESPECIALIDADES DE VIDRIO**

<b>ESPECIALIDAD DE VIDRIO</b>	<b>VALOR DE K2</b>
<b>VIDRIO PARA ENVASES CRISTAL CALIZO Y PLOMO</b>	<b>6</b>
<b>BOROSILICATO FIBRA DE VIDRIO LANA DE VIDRIO VIDRIO PLANO</b>	<b>12</b>

Para tal efecto las industrias de vidrio del país establecerán programas de instalación de equipos y los dispositivos para el control de óxidos de nitrógeno y partículas a fin de conocer el estado de cumplimiento de cada instalación con la presente norma.

Una vez publicada oficialmente esta norma, La Secretaría de Desarrollo Social autorizará los programas y/o acciones que se requieran desarrollar para el control de las emisiones de óxidos de nitrógeno y material particulado en las industrias vidrieras del país.

El Proyecto de **NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-SEDESOL-CCAT- /93**, se aprueba y se publica el 1 de Febrero de 1996 por la Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca en el Diario Oficial de la Federación [13], como :

**NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-097-ECOL-1995**

Que establece los límites máximos permisibles de emisión a la atmósfera de material particulado y óxidos de nitrógeno en los procesos de fabricación de vidrio en el país. La presente Norma Oficial Mexicana entrará en vigor a los treinta días de su publicación en el Diario Oficial de la Federación ( Entro en vigor el día 1 de Marzo de 1996 ).

Los niveles máximos permisibles propuestos en el Proyecto de Norma Oficial Mexicana mostrados en la tabla 10 se modifican en esta Norma Oficial Mexicana NOM-097-ECOL-95 y quedan como se muestran en las tablas 15 y 16.

En esta modificación se distingue entre envases de vidrio calizo y envases de vidrio borosilicato y se adiciona la especialidad de cristal calizo de color y sus correspondientes valores de emisiones máximas permisibles de óxidos de nitrógeno, que en la tabla 10 no se había tomado en cuenta.

Se observan varios cambios en los valores de emisiones máximas de la tabla 10 con respecto a las tablas 15 y 16. Por ejemplo en el caso de la especialidad de cristal calizo opalino y plomo para hornos regenerativos de la tabla 10, se observa que en la tercera etapa se tenían valores más estrictos de emisiones y en la actual norma se modifican los valores de emisión máxima permisible, haciéndolos menos estrictos. Para este caso las zonas críticas para la ZMCM se amplía la emisión máxima permisible un 66 %, para las otras zonas el 50% y para el resto del país del 55%.

TABLA 15

EMISIONES DE ÓXIDO DE NITRÓGENO EXPRESADAS EN Kg/Ton DE VIDRIO FUNDIDO DE NOM-097-ECOL-1996.

HORNOS EXISTENTES			EMISION MÁXIMA PERMISIBLE DE ÓXIDOS DE NITRÓGENO (kg./Ton(v))								
ESPECIALIDAD	TECNOLOGÍA	TIRO	ZONAS CRÍTICAS						RESTO DEL PAÍS		
			ZMCM			OTRAS			1'	2'	3'
			1'	2'	3'	1'	2'	3'			
ENVASE VIDRIO CALIZO	REGENERATIVO	CHIMENEA	4.0	3.4	2.0	4.8	4.0	2.4	5.8	4.8	2.9
	RECUPERATIVO	MORGAN	7.2	6.0	3.6	8.6	7.2	4.5	8.6	7.2	4.3
		CHIMENEA	2.5	2.1	2.0	3.0	2.5	2.1	3.6	3.0	2.5
ENVASE VIDRIO BOROSILICATO	REGENERATIVO	CHIMENEA	15.0	10.0	5.0	30.0	27.0	10.0	33.0	30.0	12.0
PLANO COLOR	REGENERATIVO	CHIMENEA	10.8	9.0	6.5	11.6	9.7	7.0	12.4	10.4	7.5
PLANO CLARO	REGENERATIVO	CHIMENEA	7.8	6.5	6.0	8.4	7.0	6.5	9.0	7.5	7.0
CRISTAL PLOMO	UNIT. MELTER	CHIMENEA	4.8	4.0	2.4	5.8	4.8	2.9	6.8	5.6	3.4
CALIZO CRISTALINO	REGENERATIVO	CHIMENEA	7.2	6.0	5.0	8.6	7.2	6.0	10.0	8.4	7.5
CRISTAL CALIZO DE COLOR	UNIT MELTER	CHIMENEA	7.2	6.0	5.0	8.8	7.2	6.0	10.0	8.4	7.0
	REGENERATIVO	CHIMENEA	10.8	9.0	6.5	11.6	9.7	7.0	12.4	10.4	7.5
BOROSILICATO CRISTALINO Y OPALINO	REGENERATIVO	CHIMENEA	15.0	10.0	5.0	30.0	27.0	10.0	33.0	30.0	12.0
FIBRAS DE VIDRIO	CUALQUIERA	CHIMENEA	8.0	7.0	4.0	8.5	8.0	4.2	8.5	8.0	4.2

**TABLA 16**

**HORNOS DE NUEVA CREACIÓN O CON MODIFICACIÓN MAYOR DE LA NOM-097-ECOL-1996.**

HORNOS DE NUEVA CREACIÓN O CON MODIFICACIÓN MAYOR			EMISIÓN MÁXIMA PERMISIBLE DE ÓXIDOS DE NITRÓGENO EXPRESADOS EN KILOGRAMOS / TONOMETRADA DE VIDRIO FUNDIDO		
ESPECIALIDAD VIDRIO	TECNOLOGÍA		ZMCM	OTRAS ZONAS CRÍTICAS	RESTO DEL PAÍS
ENVASE CALIZO CLARO	CUALQUIERA	CHIMENEA	2.0	2.6	3.2
ENVASE BOROSILICATO	CUALQUIERA	CHIMENEA	5.0	10.0	12.0
PLANO COLOR	CUALQUIERA	CHIMENEA	6.5	7.0	7.5
PLANO CLARO	CUALQUIERA	CHIMENEA	6.0	6.5	7.0
CRISTAL PLOMO Y CALIZO CRISTALINO	CUALQUIERA	CHIMENEA	5.0	6.0	7.0
CALIZO COLOR	CUALQUIERA	CHIMENEA	6.5	7.0	7.5
CRISTAL BOROSILICATO, CRISTALINO Y OPALINO	CUALQUIERA	CHIMENEA	5.0	10.0	12.0
FIBRAS	CUALQUIERA	CHIMENEA	4.0	4.5	5.0

Las etapas de cumplimiento para las emisiones de óxidos de nitrógeno y material particulado para las tablas 10 y 12 se ven modificadas en su tercera etapa (3ª ETAPA) como se muestra:

<b>PROYECTO DE NORMA</b>	96 Meses después de entrada en vigor
<b>NORMA OFICIAL MEXICANA</b>	120 Meses después de la entrada en vigor de esta norma

Como se observa el plazo que tiene la industria vidriera para cumplir con las emisiones máximas permisibles que se establecen en las tablas 15, 16 y 17 se alarga 24 meses más. Las etapas de cumplimiento para las emisiones de óxidos de nitrógeno y material particulado para esta Norma Oficial Mexicana aprobada queda:

ETAPA	PLAZO DE CUMPLIMIENTO	FECHA
1ª	18 Meses después de la entrada en vigor de esta Norma.	1 de Julio de 1996 al 1 de Enero de 1998.
2ª	48 Meses después de la entrada en vigor de esta Norma.	1 de Enero de 1998 al 1 de Enero de 2002.
3ª	120 Meses después de la entrada en vigor de esta Norma.	1 de Enero de 2002 al 1 de Enero de 2012.

Aunque la Norma Oficial Mexicana NOM-097-ECOL-1995 fue publicada como se señaló el día 1 de Enero de 1996, contenía algunos errores de escritura en el contenido de la norma, por lo cual el día 1 de Julio, se publicó en el Diario Oficial la aclaración a la Norma Oficial Mexicana NOM-097-ECOL-1995. Por lo tanto a partir de esta fecha como se muestra en el cuadro anterior entra en vigor la norma.

En el proyecto de norma se indicaba que después de ser publicada este proyecto de norma como norma oficial se contaban 18 meses para que después de este plazo ningún horno de fusión de vidrio no debiera rebasar los límites de emisión indicados en la tabla 11. Este periodo aunque no se menciona en la Norma Oficial la industria vidriera la conoce como la Etapa 0.

En la Norma Oficial se modificaron los límites de emisiones máximas permisibles de óxidos de nitrógeno, y quedan como se muestra en la tabla 17. En esta tabla se adiciona la especialidad de " Vidrio Envase Calizo Color " y se clasifica en una forma más amplia los tipos de vidrios que esta Norma Oficial abarca.

La Norma Oficial señala que cuando un mismo propietario tenga más de un horno en un mismo predio, el valor de emisión a comparar será el valor ponderado de acuerdo a la ecuación 1 que ya se había señalado en el proyecto de norma. Lo único que cambia es que se define a  $E_i$  como:

$E_i$  = Emisión correspondiente a cada horno, expresada en Kilogramos por tonelada de vidrio fundido, calculada según la ecuación 3 para óxidos de nitrógeno y la ecuación 5 para material particulado.

En la Norma Oficial se menciona que cuando un mismo propietario tenga más de un horno en un mismo predio, el valor máximo permisible de emisión será el resultado de la ponderación de acuerdo a la ecuación 2. Aquí se define a  $E_m$  como:

$E_m$  = Emisión permisible al horno correspondiente, tomado de las tablas 15, 16 y 17 para óxidos de nitrógeno y de las tablas 18, 19, 20, 21 y 14 para material particulado.

La emisión a comparar con el resultado de la ecuación 2 deberá ser calculada con la ecuación 1.

**TABLA 17**  
**EMISIONES MÁXIMAS PERMISIBLES DE ÓXIDOS DE NITRÓGENO**  
**PARA DIFERENTES TIPOS DE VIDRIOS**

ESPECIALIDAD	EMISIÓN MÁXIMA PERMISIBLE DE ÓXIDOS DE NITRÓGENO EN kg./Ton VIDRIO FUNDIDO
Vidrio Envase Calizo Claro	10.0
Vidrio Envase Calizo Color	11.0
Vidrio Envase Borosilicato	35.0
Vidrio Plano Color y Claro	13.0
Vidrio Cristal ( Calizo, Opalino y Plomo )	11.0
Vidrio Cristal Borosilicato	35.0
Vidrio Ópalo Borosilicato	35.0
Fibra de Vidrio	10.0

Se señala en La Norma Oficial que las emisiones de óxidos de nitrógeno en cada horno deberá ser calculada con la ecuación 3 y la emisión máxima permisible de partículas en hornos de fundición de vidrio será calculada con la ecuación 4 y con las tablas 17 y 18 para todas las especialidades, a excepción de vidrios borosilicatos y específicamente de envase y cristalería, las cuales se regirán por la misma ecuación 4 y con las tablas 19 y 20 de esta Norma Oficial Mexicana.

Para la constante K1 los valores se indican en las tablas 18, 19 y 20, según corresponda a la especialidad del vidrio y a la fecha de cumplimiento.

**TABLA 18**  
**CONSTANTE K1 VIDRIOS CALIZO DESPUÉS DE 18 MESES**  
**DE ENTRADA LA NORMA EN VIGOR**

ETAPA	ZMCM	OTRAS ZONAS CRÍTICAS	ZONAS RESTO DEL PAÍS
1*	4.35	5.20	6.52
2*	4.00	4.70	5.90
3*	2.20	3.10	4.56
Hornos Nuevos o Reconstruido	2.20	3.10	4.56

**TABLA 19**  
**CONSTANTE K1 VIDRIOS CALIZOS PRIMEROS 18 MESES**  
**DE ENTRADA LA NORMA EN VIGOR**

ZONA	FACTOR K1
Z M C M	7.0
OTRAS ZONAS CRÍTICAS	8.5
ZONA. RESTO DEL PAÍS	12.0

**TABLA 20**

**CONSTANTE K1 VIDRIOS Y CRISTALES BOROSILICATOS DESPUÉS DE 18 MESES DE ENTRADA LA NORMA EN VIGOR**

ETAPA	ZMCM	OTRAS ZONAS CRITICAS	ZONAS RESTO DEL PAIS
1*	8.7	10.4	13.04
2*	8.0	9.4	11.80
3*	4.4	6.2	9.12
Hornos Nuevos o Reconstruido	4.4	6.2	6.20

**TABLA 21**

**CONSTANTE K1 VIDRIOS Y CRISTALES BOROSILICATOS PRIMEROS 18 MESES DE ENTRADA LA NORMA EN VIGOR**

ZONA	FACTOR K1
Z MCM	14.0
OTRAS ZONAS CRITICAS	17.0
ZONA RESTO DEL PAIS	24.0

Los hornos con capacidad de producción superior a 100 toneladas de vidrio fundido por día y ubicados en zonas críticas, deberán contar con medición continua de óxidos de nitrógeno en la chimenea en conjunto con la concentración de oxígeno y monóxido de carbón y deberá registrarse diariamente en su bitácora de operación.

Los hornos de capacidad inferior a 100 toneladas por día y aquellos ubicados en zonas del resto del país, deberán verificar sus emisiones de NOx y partículas por lo menos cada seis meses.

Los reportes de emisión deberán incluir además de los parámetros de la medición en la chimenea, las condiciones de operación en que se realizó, tales como:

1. Producción ( Ton/día de vidrio fundido ).
2. Temperatura del horno ( °C ).
3. Volumen y tipo de combustible a 20 °C y 1 kg./cm<sup>2</sup>.
4. % de vidrio reciclado ( cullet ).
5. Tipo de vidrio y/o producto procesado.

En esta Norma Oficial Mexicana se menciona en el punto 5.1 que no hay normas equivalentes y que las disposiciones de carácter interno que existen en otros países no reúnen los elementos y preceptos de orden técnico y jurídico que en esta Norma Oficial Mexicana se integran y complementan de manera coherente, con base en los fundamentos técnicos y científicos reconocidos internacionalmente.

Comparando los límites de emisiones de la Norma Oficial Mexicana NOM-097-ECOL-1995 con las legislaciones de emisiones de contaminantes para la industria del vidrio más estrictas de países como Alemania y E.U.A., se observa como los límites de emisiones para NOx y partículas en México no son tan estrictos y en el futuro no se observan reducciones importantes en las emisiones que pudieran ayudar considerablemente en la calidad del aire. Se muestra esta comparación en la tabla 22.

**TABLA 22**  
**COMPARACIÓN DE LÍMITES DE EMISIONES CONTAMINANTES**  
**EN LA FABRICACIÓN DE VIDRIO**

PAIS	ACTUAL		FUTURO	
	NOx kg./Ton	PARTÍCULAS kg./Ton	NOx kg./Ton	PARTÍCULAS kg./Ton
E.U.A.	1.8	0.09 - 0.45	0.90	0.09
ALEMANIA	2.5 - 7.0	0.1	0.30	0.10
MÉXICO*	2.5 - 7.2	0.3 - 1.22	2.0 - 3.6	0.50

\* Se toman los valores de la Norma Oficial Mexicana NOM-097-ECOL-1995 para la zona metropolitana de la ciudad de México (Valores más estrictos del país).

Se observa que en La Norma Oficial Mexicana que establece los límites máximos permisibles de emisión a la atmósfera de material particulado y óxidos de nitrógeno, no se mencionan valores límites para legislar las emisiones de SOx en los procesos de fabricación del vidrio.

Esto es importante ya que en México existen algunos hornos de fusión de vidrio que utilizan Combustóleo, Diesel o Gasóleo, por lo cual las emisiones de SOx están presentes. Como se observa en la tabla 2 de emisiones contaminantes para vidrio Sódico - Cálcico los hornos que utilizan combustóleo las emisiones de SOx son más significativas que en las que emplean gas natural.

La realización y aprobación de esta Norma Oficial Mexicana es un buen comienzo para el control de emisión de contaminantes por la industria del vidrio, pero si se tiene como propósito minimizar el impacto al ambiente que resulta de las emisiones, es conveniente implementar límites semejantes a los que se aplican en países como los mostrados en la tabla 22, aunque existan problemas económicos y tecnológicos que frecuentemente impidan soluciones inmediatas y en algunos casos hagan complicado el cumplir con las condiciones mínimas legisladas para reducir las alteraciones al medio ambiente.





**EFFECTOS CONTAMINANTES  
DEL AIRE EN PLANTAS,  
ANIMALES Y HUMANOS**

## CAPITULO III

### EFFECTOS DE CONTAMINANTES DEL AIRE EN PLANTAS, ANIMALES Y HUMANOS.

Se sabe desde hace tiempo que la contaminación del aire producida por las actividades industriales del hombre llenen efectos importantes y ocasionalmente devastadores sobre animales, plantas y en el mismo ser humano.

La lesión o daño por contaminantes se discuten bajo tres encabezamientos principales:

1. El receptor, ya sea ser humano, planta o animal.
2. El contaminante, particularmente su forma física y química.
3. El medio ambiente, en el que el receptor y el contaminante coexisten.

Un contaminante es toda aquella materia y energía que en cualesquiera de sus estados físicos y formas, que al incorporarse o actuar en la atmósfera, agua, suelo, flora, fauna o cualquier elemento natural, se altera o modifica su composición y/o condición natural. Equilibrio ecológico es la relación de interdependencia entre los elementos que conforman el ambiente que hace posible la existencia, transformación y desarrollo del hombre y demás seres vivos.

Países de la " Comunidad Económica Europea" han estimulado considerablemente la investigación acerca de los efectos de los contaminantes individuales del aire en las plantas e investigaciones en animales con el interés por la repercusión sobre la salud humana.

Se ha encontrado que los principales contaminantes del aire responsables del daño a las plantas son dióxido de azufre ( $SO_2$ ), fluoruros, humos, hollín, polvos y los componentes del smog fotoquímico.

En cuanto a los más dañinos para los animales de granja son los fluoruros y los polvos metálicos. Las plantas son por lo general más susceptibles al daño por contaminantes gaseosos, mientras que los animales parecen ser más propensos al daño por partículas contaminantes.

En el caso de las plantas, los síntomas de las lesiones debidas a los contaminantes del aire aparecen primero en los tejidos de las hojas a escala microscópica y las células o tejidos particulares afectados indican con frecuencia el agente causante. La susceptibilidad a las lesiones por un contaminante son según la especie y el genotipo de la planta; por ejemplo la cebada y la alfalfa son más susceptibles al dióxido de azufre y menos al fluoruro de hidrógeno que el maíz y la cebolla.

En los animales los contaminantes penetran por inhalación a través del aparato respiratorio. El  $SO_2$  causa constricción de los conductos de paso del aire, lo que desencadena tos, mientras que el dióxido de nitrógeno y el ozono producen cambios de la capilaridad pulmonar.

Las emisiones tóxicas en las personas afectan distintas áreas del cuerpo humano:

1. La piel humana es una zona muy sensible del cuerpo, pero parece no presentar ningún problema crítico con los contaminación ambientales de las grandes ciudades. Esto quizás se deba a que la piel se encuentra en la mayor parte de su área protegida por ropa.
2. Los ojos son de las zonas más sensibles que expuestos a prolongados períodos o concentraciones de contaminantes se irritan fácilmente e inclusive pueden presentar conjuntivitis.

3. El cabello , aunque es una área expuesta siempre y ofrece una basta zona para absorber contaminantes, únicamente se ha encontrado problemas de cambio de coloración del pelo y resequeadad, pero ningún efecto perjudicial crítico.
4. Una de las partes más susceptibles al ataque de contaminantes del organismo humano es el sistema respiratorio ya que los gases y partículas penetran en el organismo a través de él. La lesión crónica capaz de producirse dependerá del estado físico de cada individuo, edad, tiempo de exposición, concentración y tipo de contaminante

El sistema respiratorio consta de un sistema superior ( Cavidad Nasal, Faringe y Traquea ) y un sistema inferior ( Bronquios y Pulmones ). La cavidad nasal y la tráquea son recubiertas por una membrana mucosa que en algunas zonas se encuentra ciliada, donde gases contaminantes solubles en agua como el bióxido de azufre pueden disolverse en la mucosa nasal dañándola.

Por ejemplo; con concentraciones bajas de aproximadamente 0.1 ppm de SO<sub>2</sub> únicamente el 50 % es removido en la cavidad nasal y el resto pasa por la traquea reteniendo una parte del contaminante y el resto pasa a la zona baja de los pulmones produciendo daños severos en bronquios y alvéolos si la exposición es prolongada en períodos frecuentes de tiempo.

Existen aproximadamente 700 millones de alvéolos con una área de superficie de más de 100 m<sup>2</sup> para tratar los gases. Esta capacidad disminuye considerablemente por exposición prolongada del individuo a contaminantes en el aire ya que partículas diminutas saturan a lo largo de los años los alvéolos. En la figura 4 se muestra el diagrama del sistema respiratorio humano en donde se señalan en forma esquemática las partes del sistema mencionado.

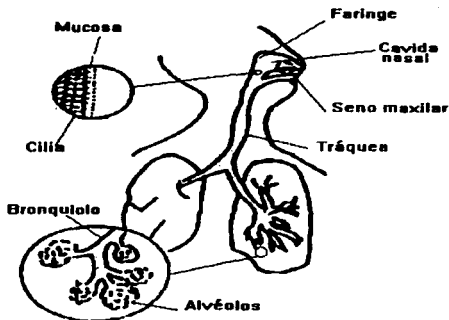


FIGURA 4 : Esquema del Sistema Respiratorio Humano.

La medida de las partículas que entran al sistema respiratorio por los gases contaminantes en general son de gran importancia ya que dependiendo del tamaño afectarán en forma crítica áreas del sistema respiratorio en forma específica. En la figura 5 se muestra la fracción depositada de contaminantes en varias partes del sistema respiratorio. Más adelante se señalarán los efectos generales de varios contaminantes del aire en la salud humana

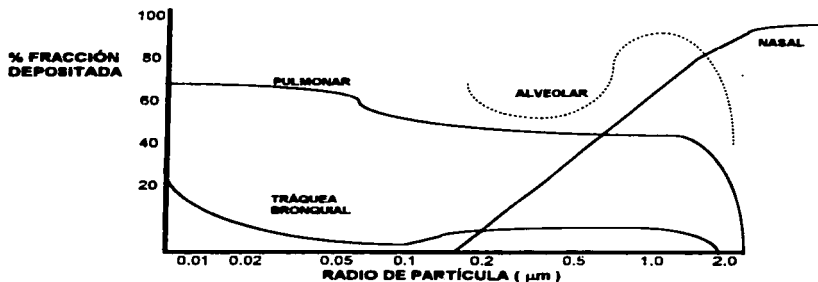


FIGURA 5 : Partículas Depositadas (  $\mu\text{m}$  ) en el Sistema Respiratorio Humano [14].

### 3.1. EFECTOS DE CONTAMINANTES DEL AIRE EN HUMANOS

#### 3.1.1. EFECTOS DEL BIÓXIDO DE AZUFRE ( $\text{SO}_2$ ):

La toxicología del  $\text{SO}_2$  en las personas dependerá generalmente del tipo de individuo y el tiempo de exposición. Se señala en la literatura que la concentración máxima para 8 horas de exposición en el trabajo en una industria es de 5 ppm, pero en algunos casos personas expuestas en el mismo periodo de tiempo a concentraciones de 1 ppm de  $\text{SO}_2$  han sufrido lesiones críticas..

Las interacciones entre dos o más contaminantes del aire lo mismo aumentan que disminuyen sus efectos potenciales como contaminantes individuales. Cuando la toxicidad de dos componentes se incrementa por su interacción, se dice que existe un acto sinérgico.

Una reacción de este tipo se encuentra en el tabaco, que produce lesión con una mezcla de 0.03 ppm de ozono y 0.30 ppm de  $\text{SO}_2$ , mientras que la misma exposición a los contaminantes individuales no produce lesión

Un ejemplo clásico es del  $\text{SO}_2$  - Smog. La sinergia se origina por:

1. Adsorción de  $\text{SO}_2$  sobre partículas que frecuentemente contienen catalizadores metálicos que ayudarán a su oxidación para generar un ácido sulfúrico más irritante.
2. Partículas que permiten adsorber compuestos de azufre se depositan en los pulmones hasta por meses originando lesiones críticas en el sistema respiratorio.
3. Los gases y partículas de  $\text{SO}_2$  golpean suavemente los cilios ( Los cilios tienen la función de remover las partículas del sistema respiratorio ) disminuyendo su efectividad.

El efecto de esta sinergia en la salud de humanos es ilustrado en la figura 6.

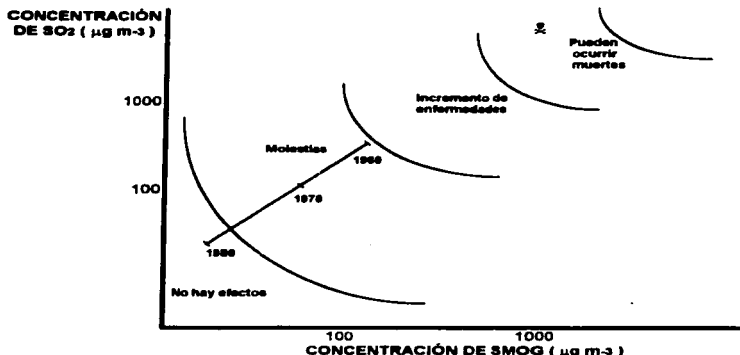


FIGURA 6 : Efectos en la Salud a Diferentes Concentraciones de Bióxido de Azufre y Smog [14].

En la figura 6 se marca la tendencia de la reducción de la concentración del smog y el  $\text{SO}_2$  en Londres ( de 1960 a 1980 ) después de establecer regulaciones ecológicas estrictas al haber tenido problemas de contaminación críticos como los registrados como evidencia epidemiológica de el peor día del " Smog de Londres " en 1952 ( Se señala las concentraciones alcanzadas en ese día por el símbolo  $\lambda$  en la figura 6 ), donde se registraron alrededor de 4000 muertes.

Estas muertes pudieron ser evitadas si se hubieran establecido las regulaciones ecológicas y dado la importancia al "Smog de Londres" desde el invierno de 1679 donde se presentó un episodio de contaminación donde fallecieron un número importante de personas. En las figuras 7a y 7b se muestran las evidencias de la mortalidad (7a) y condiciones atmosféricas (7b) durante el invierno de 1679 en Londres.

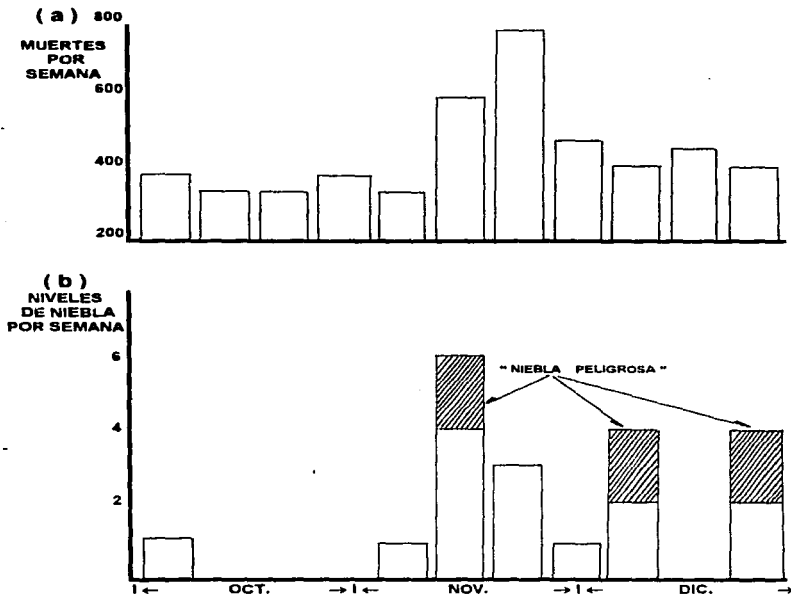


FIGURA 7 : Registros de Mortalidad ( a ) y Condiciones Ambientales ( b ) en el invierno de 1679 en Londres [14].

En la figura 7b se puede observar que en el primer incremento del índice de niebla marcado como "Niebla Peligrosa" corresponde a las semanas donde el índice de mortalidad aumentó notoriamente, en el segundo incremento de índice de "Niebla Peligrosa" marcado los índices de mortalidad no aumentaron en la misma proporción que en el primer episodio.

Es posible que esto se haya debido a que la población más susceptible o enferma haya muerto en el primer episodio de "Niebla Peligrosa". Lo importante de esa información es de conscientizar a toda la población de los efectos a la salud o de llegar a muertes de personas si no establecemos, contamos y aplicamos las leyes ecológicas en forma adecuadas en el presente y futuro.

Existen otros efectos del SO<sub>2</sub> en la salud a diferentes intervalos de concentración como los mostrados en la tabla 23.

**TABLA 23**  
**EFFECTOS DEL SO<sub>2</sub> EN LA SALUD HUMANA [14].**

CONCENTRACIÓN ( ppm )	SECUELAS EN LA SALUD
0.3 - 0.25	• Se incrementa la sensibilidad de adaptación de los ojos a la oscuridad.
1.0	• Decrece la relación de flujo de la mucosa humana.
10.0	• Cambios en el epitelio respiratorio.
100.0	• 50 % de incremento en el flujo de resistencia pulmonar.

### 3.1.2. EFECTOS DE LOS ÓXIDOS DE NITRÓGENO:

El óxido nítrico ( NO ) es un gas inerte y moderadamente tóxico, aunque el NO con el CO al combinarse con la hemoglobina ocasionan una reducción en la capacidad de oxigenación de la sangre. El NO es fácilmente oxidado para obtener NO<sub>2</sub>, que es un agente oxidante y es asociado con la contaminación fotoquímica.

El NO<sub>2</sub> irrita los alvéolos de los pulmones. Algunos de los efectos de este contaminante a la salud a diferentes concentraciones son mostrados en la tabla 24 y 25 se señala la reacción humana a periodos cortos de exposición a diferentes concentraciones de NO<sub>2</sub>.

**TABLA 24**

**EFFECTOS A DIFERENTES CONCENTRACIONES DE NO<sub>2</sub> A LA SALUD [14].**

CONCENTRACIÓN (ppm)	SECUELAS EN LA SALUD
Menos de 0.1 0.1 - 0.25	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se afectan las células del órgano olfativo.</li> <li>• Deterioro a adaptarse a la obscuridad. Se presentan algunos efectos epidemiológicos.</li> </ul>
0.5	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se presentan algunos cambios en la morfología y bioquímica del pulmón.</li> </ul>
1.5	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se incrementa la resistencia en las vías respiratorias de personas enfermas de los bronquios.</li> </ul>
2.5	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se incrementa la resistencia en las vías respiratorias en personas normales.</li> </ul>
13.0	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Irritación en ojos y cavidad nasal.</li> </ul>

**TABLA 25**

**REACCIONES A LA SALUD HUMANA A PERIODOS CORTOS DE EXPOSICIÓN A DIFERENTES CONCENTRACIONES DE NO<sub>2</sub> [15].**

EFFECTOS	mg / m <sup>3</sup>	ppm	PERIODO DEL EFECTO
• Se detecta mal olor	0.23	0.12	Inmediato
• Principios de problemas de adaptación a la obscuridad.	0.14	0.075	No hay reporte
	0.50	0.26	No hay reporte
• Se incrementa la resistencia en las vías respiratorias en el sistema respiratorio humano.	1.3 - 3.8	0.7 - 2.0	20 min.*
	3.0 - 3.8	1.6 - 2.0	15 min.
	2.8	1.5	45 min. ⊕
	3.8	2.0	45 min. ⊕
	5.6	3.0	45 min. ⊕
	7.5 - 9.4	4.0 - 5.0	40 min. ⊕
	9.4	5.0	15 min.
	11.3 - 75.2	6.0 - 40.0	5 min.
• Decrecimiento pulmonar	7.5 - 9.4	4.0 - 5.0	15 min.

\* Exposición durante 10 minutos. Los efectos sobre la reducción de flujo en las vías respiratorias en el sistema respiratorio humano (SRH) fue observado 10 minutos después de la terminación de la exposición.

⊕ Se produjo el efecto anterior a esta concentración con personas de enfermedad crónica del sistema respiratorio.



- ⊗ El mismo efecto ocurrió con personas en reposo con enfermedad crónica del sistema respiratorio.
- ⊗ Se produce el mismo problema en personas normales que se encuentran en reposo.
- ⊗ Exposición durante 10 minutos. Los efectos máximos sobre la resistencia en las vías del sistema respiratorio humano ( SRH ) fue observado 30 minutos después de la terminación de la exposición.

En exposiciones experimentales con personas voluntarias a 9.4 mg/m<sup>3</sup> ( 5 ppm ) de NO<sub>2</sub> , arriba del pico registrado en Los Angeles que fue de 7.0 mg /m<sup>3</sup>. La exposición por 10 minutos produjo un incremento en la resistencia en las vías respiratorias, afectando notoriamente los pulmones.

Concentraciones de 47 a 141 mg/m<sup>3</sup> ( 25 a 125 ppm ) causaron reversible pulmonía. Concentraciones altas de 285 mg/m<sup>3</sup> ( 150 ppm ) puede ocasionar la muerte o producir lesiones críticas a la salud humana.

Un estudio [15] demostró que un 18 por ciento de una cierta cantidad de miembros de familia que viven en una área en la cual se midió las 24 horas la concentración de NO<sub>2</sub> durante un período de 6 meses presentaron enfermedades respiratorias. Las concentraciones en este período fueron de 0.12 a 0.20 mg/m<sup>3</sup> ( 0.062 - 0.109 ppm ) .

El estudio también demostró un incremento frecuente de bronquitis aguda en infantes y niños de edad escolar en una área donde se midió el NO<sub>2</sub> las 24 horas por un período de 6 meses. Las concentraciones registradas en este período fueron de 0.12 a 0.16 mg/m<sup>3</sup> ( 0.063 - 0.083 ppm ) .

El resultado de esta investigación es el de mostrar que en una ciudad donde el promedio de concentración durante las 24 horas es de 0.11 mg/m<sup>3</sup> ( 0.06 ppm ) se provoca un incremento en enfermedades respiratorias.

### 3.1.3. EFECTOS DEL OZONO Y OXIDANTES:

En contraste con el " Smog tipo Londres " , que contiene humo , niebla y elevada concentración de SO<sub>2</sub> , el smog fotoquímico o denominado con frecuencia " Smog Tipo de los Angeles " que se encuentra en muchas ciudades , no contiene ni humo ni niebla y se caracteriza por su elevada concentración de oxidantes, principalmente de ozono.

Se sabe que el smog fotoquímico proviene de reacciones en la atmósfera entre los óxidos de nitrógeno y ciertos hidrocarburos, ambos derivados de la combustión incompleta de combustibles líquidos de la industria y vehículos de motor. Los productos fitotóxicos de las reacciones fotoquímicas que se han identificado hasta la fecha son ozono ( O<sub>3</sub> ) , nitratos de peroxiácidos ( abreviatura inglesa : PAN ) , nitratos peroxipropinol ( PPN ) , nitrato peroxibutil ( PBN ) , dióxido de nitrógeno ( NO<sub>2</sub> ) y nitratos de álcali.

Paralelo con el incremento de la contaminación fotoquímica se presentan tendencias a formar lluvia ácida. Aunque la lluvia normal es naturalmente ácida, ya que el CO<sub>2</sub> de la atmósfera se disuelve lo suficiente y el pH de equilibrio del agua de lluvia pura debe ser de alrededor de 5.6. En ciudades de E.U.A. y Europa se han medido valores de pH menores de 3.0; en la tabla 26 se muestra la composición típica de lluvia urbana.

**TABLA 26**  
**COMPOSICIÓN DE LLUVIA URBANA [14].**

COMPONENTE	CONCENTRACIÓN ( mol L-1 )
SULFATO	0.0001
BISULFITO	0.00002
NITRATO	0.00003
NITRITO	0.000001
PERÓXIDO DE HIDROGENO	0.000006
FIERRO	> 0.00002
FORMALDEHÍDO	> 0.000008
CINC	> 0.000008
COBRE	> 0.000008
VANADIO	> 0.00001
MANGANESO	> 0.0000005
ACETALDEHÍDO	> 0.000001
COMPUESTOS POLICICLICOS ORGÁNICOS	> 0.0000001

La lista de los compuestos mostrados en la tabla 26 no es completa pero presenta los componentes principales de una lluvia típica urbana. En la tabla 27 se muestran los niveles de concentración típicos del "Smog Fotoquímico" de las ciudades del oeste de la costa de E.U.A. [14].

El ozono es un compuesto que en forma natural se encuentra presente tanto a nivel del suelo ("tropósfera") como en las capas superiores de la atmósfera ("estratósfera"). En la estratósfera, el ozono absorbe gran parte de la radiación ultravioleta emitida por el sol, que puede producir cáncer en la piel.

Las acciones del hombre aumentan o disminuyen las concentraciones naturales de ozono. En la estratósfera contaminantes como los clorofluorocarburos (CFC), empleados en sistemas de refrigeración, aires acondicionados, aerosoles, espumas plásticas y algunos extinguidores de incendios, son capaces de destruir la capa de ozono estratosférico ya que una molécula de CFC tiene una vida mayor de 100 años y su actividad puede destruir 100 mil moléculas de ozono en ese lapso.

En la tropósfera la quema de hidrocarburos aumenta la formación de ozono debido al incremento en las emisiones de NOx. Un primer ciclo de reacciones explica la formación y destrucción del ozono con base a la disociación del bióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) que libera un átomo libre de oxígeno y una molécula de monóxido de nitrógeno (NO); el átomo libre de oxígeno se une al oxígeno molecular (O<sub>2</sub>) formando una molécula de ozono (O<sub>3</sub>). El ozono reacciona a su vez con el monóxido de nitrógeno y se disocia para formar de nuevo oxígeno molecular y bióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>), cerrándose así el ciclo.

\*Tropósfera: zona inferior de la atmósfera, de un espesor de 11 Km. aproximadamente.

\*\*Estratósfera: región de la atmósfera, entre la tropósfera y la mesosfera\*\*\*, que ocupa unos treinta kilómetros en los que la temperatura es constante.

\*\*\*Mesosfera: capa atmosférica que se extiende por encima de la estratósfera.

**T A B L A 27**

**COMPOSICIÓN DEL SMOG FOTOQUÍMICO ( ppb\* )**

<b>CONTAMINANTE</b>	<b>VALORES OBTENIDOS EN LA MAÑANA</b>	<b>VALORES OBTENIDOS A OTROS HORARIOS</b>
MONÓXIDO DE CARBÓN	1000	
ÓXIDO NÍTRICO	300	Antes del medio día 20
BIÓXIDO DE NITRÓGENO	70	Valores al mediodía 200
TRIOXIDO DE NITRÓGENO	0.1	
PENTÓXIDO DE NITRÓGENO	0.2	
ÁCIDO NITROSO	0.4	
OZONO	30	Valores en la tarde 200
HIDROCARBUROS DE METANO	300	
ALQUENOS	30	
FORMALDEHÍDO	100	
OTROS ALDEHÍDOS	50	Valores en la tarde 300
PAN		10 - 50
<b>CONCENTRACIÓN ( <math>\mu\text{g cm}^{-3}</math> )</b>		
RADICAL HIDROPEROXICO	10,000,000,000	No se reportan datos
RADICAL DIDROXILO	100,000,000	
OXÍGENO ATÓMICO	100,000	
HIDRÓGENO ATÓMICO	< 1	

A diferencia de la mayoría de las ciudades del hemisferio norte donde el ozono troposférico se presenta durante los días de verano, cuando la radiación solar es significativamente mayor durante el resto del año, en la Ciudad de México el ozono tiene condiciones propicias para su formación durante el resto del año, con altas concentraciones al terminar el invierno y al inicio de la primavera ya que la geografía de la Ciudad de México se comporta como un gigantesco matraz de reacción.

Las paredes del matraz las componen las montañas y el fondo del valle, las frecuentes inversiones de temperatura hacen como de tapadera del matraz esto provoca que los contaminantes queden atrapados y las personas estén expuestas a estos tóxicos.

Ocurre una inversión de temperatura cuando una capa de aire caliente cubre la de aire frío adyacente a la tierra, situación que impide la mezcla por convección turbulenta con el resto de la tropósfera. De esta forma todos los gases que llegan a esa masa de aire quedan atrapados en ella. Se produce una inversión de temperatura a gran escala en la tropopausa, que separa de forma eficaz la tropósfera de la estratósfera. A este "matraz" de reacción se vierten los reactivos de la niebla fotoquímica, constituidos por las emisiones de las chimeneas y la energía para la reacción proviene del espectro de la radiación solar.

Dada la elevada concentración de hidrocarburos en la atmósfera y el alto potencial reactivo de ésta, debido a la elevada radiación solar que recibe el valle de México, una conclusión preliminar que resulta es que el control de los óxidos de nitrógeno podría ser el camino más rápido para obtener reducciones en la magnitud de los "picos" de ozono. Algunos efectos del ozono a la salud se muestran en la tabla 28.

\* ppb: partes por billón. 80 ppb = 160  $\mu\text{g m}^{-3}$  [14].

**TABLA 28**

**EFFECTOS GENERALES POR EXPOSICIÓN DE OZONO EN LA SALUD HUMANA [14].**

<b>CONCENTRACION (ppm)</b>	<b>SECUELAS EN LA SALUD</b>
0.1	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ Sequedad de la garganta, irritación en ojos, irritación en el sistema respiratorio (principalmente en la mucosa), incremento en la resistencia de las vías respiratorias y susceptibilidad a bacterias.</li> </ul>
0.2	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ Irritación crítica en el sistema respiratorio y constricción del pecho.</li> </ul>
mayor a 2.5	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ Asma, tos y dolores de cabeza.</li> </ul>

En estudios realizados [14] con ratones expuestos a concentraciones altas de ozono se ha encontrado que se presentan daños graves en sus cromosomas, este efecto es considerado similar cuando se ha expuesto a los ratones a radiación. En cultivos de células humanas expuestas de 5 a 10 minutos a 8 ppm de O<sub>3</sub> se ha observado fractura de sus cromosomas; esto equivale a efectos producidos por 200 roentgens de radiación.

**3.1.4. EFECTOS DEL MONÓXIDO DE CARBONO (CO) :**

Este contaminante está presente en cualquier combustión de combustibles de origen fósil. Frecuentemente la generación de concentraciones altas del contaminante son asociadas con automotores pero esta no es la única fuente que puede perjudicar la salud, por ejemplo el humo de un cigarrillo origina aproximadamente 400 ppm de CO por lo que un fumador puede tener niveles altos de CO en su sangre, originando deficiencias en su salud.

Existen evidencias recientes de que en algunas personas la anemia que presentan es inducida por el CO. Con una exposición de 250 ppm de CO en un individuo puede provocar dolores de cabeza y náuseas.

La agencia de protección ambiental, el consejo de calidad ambiental y varias agencias del departamento de comercio en E.U.A. intervinieron para crear un índice estándar de contaminación denominado PSI [15]. Este índice involucra cinco de los más críticos contaminantes ( Monóxido de carbono, dióxido de azufre, partículas totales suspendidas, ozono y dióxido de nitrógeno ) medidos en el aire, donde el rango que se maneja es de 0 a 500.

La calidad del aire se considera buena únicamente cuando las mediciones ambientales dan un índice de 50 PSI o menos. En la tabla 29 se muestra un resumen de los potenciales efectos a la salud a diferentes valores de PSI.

**TABLA 29**  
**EFFECTOS A LA SALUD ASOCIADOS CON EL ÍNDICE**  
**ESTÁNDAR DE CONTAMINACIÓN ( PSI )**

<b>PSI</b>	<b>CLASIFICACIÓN</b>	<b>EFFECTOS A LA SALUD</b>	<b>PRECAUCIONES</b>
Mayor de 400	Peligroso	Prematura muerte en personas enfermas o de edad avanzada. Las personas sanas experimentan síntomas que afectan su actividad normal.	Se sugiere que todas las personas estén dentro de su hogar, cerrar puertas y ventanas. No realizar ejercicios físicos.
300 - 399	Peligroso	Personas delicadas de salud y enfermas se agravan. Además se reduce la tolerancia al ejercicio en personas enfermas.	Personas de mayor edad, enfermas y niños deben permanecer dentro de su hogar y evitar realizar ejercicios físicos. La población en general debe evitar realizar actividades en lugares expuestos al aire contaminado.
200 - 299	Muy malo	Significativas molestias y reducción a la tolerancia de ejercicio de personas enfermas de los pulmones.	Ancianos y personas enfermas del corazón y pulmones deben permanecer en interiores y evitar realizar ejercicios físicos.
100 - 199	Malo	Ligeros síntomas de agravación en personas susceptibles y síntomas de irritación en las vías respiratorias y ojos de la población en general.	Personas con problemas respiratorios o del corazón deben reducir ejercicios físicos y realizar sus actividades en el interior.
50 - 99	Moderado		
0 - 49	Buena		

En la tabla 30 se muestran algunos contaminantes atmosféricos que captan la preocupación social por los efectos que ocasionan en la salud de toda la población, pero principalmente en los niños, enfermos y ancianos [16].

**TABLA 30**

**EFFECTOS A LA SALUD POR DIFERENTES CONTAMINANTES**

<b>MATERIAL CONTAMINANTE</b>	<b>SIGNOS Y SÍNTOMAS</b>	<b>SECUELAS</b>	<b>CONC. MAX. PERMISIBLES</b>
<b>OZONO</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Irritación de ojos.</li> <li>• Inflamación de la mucosa de las fosas nasales ( Rinitis ).</li> <li>• Dificultad en respirar ( Disnea ).</li> <li>• Tos.</li> <li>• Bronquitis y Neumonía.</li> <li>• Edema pulmonar ( hinchazón del pulmón ).</li> <li>• Dolor de cabeza.</li> <li>• Vértigo.</li> <li>• Somnolencia.</li> <li>• Náuseas y Vomito.</li> <li>• Fatiga</li> </ul>	<p>El síntoma puede persistir de 6 a 9 meses pero no se ha consignado incapacidad permanente.</p>	<p>0,1 ppm en aire</p>
<b>BIÓXIDO DE AZUFRE</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Inflamación de la mucosa de la cara posterior del párpado inferior y superior (Conjuntivitis)</li> <li>• Necrosis corneal.</li> <li>• Pérdida del olfato ( Anosmia ).</li> <li>• Edema laríngeo.</li> <li>• Bronquitis.</li> <li>• Dolor en pecho y Tos.</li> <li>• Disnea.</li> <li>• Neumonitis.</li> <li>• Náuseas y Vómito.</li> <li>• Fatiga.</li> </ul>	<p>La recuperación es completa en unos días, pero la lesión de la cornea es permanente.</p>	<p>5,0 ppm en aire</p>
<b>BIÓXIDO DE CARBONO</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dolor de cabeza.</li> <li>• Vértigo.</li> <li>• Ruido de oídos.</li> <li>• Velocidad respiratoria aumentada.</li> <li>• Disnea.</li> <li>• Somnolencia e inconsciencia.</li> <li>• Temblores musculares y debilidad.</li> <li>• Acrocianosis.</li> </ul>	<p>No se ha descrito lesión permanente.</p>	<p>5000 ppm en el aire</p>
<b>MONÓXIDO DE CARBONO</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dolor de cabeza.</li> <li>• Somnolencia.</li> <li>• Náuseas y Vómito.</li> <li>• Velocidad respiratoria aumentada.</li> <li>• Disminución de visión y presión sanguínea.</li> <li>• Incoordinación muscular.</li> <li>• Confusión mental.</li> <li>• Convulsiones</li> <li>• Muerte.</li> </ul>	<p>Se puede presentar bronconeumonía después de una intoxicación grave.</p> <p>La pérdida del sentido de la orientación y de la memoria.</p>	<p>100 ppm en el aire.</p>

**TABLA 30 ( CONTINUACIÓN ).**

<b>MATERIAL CONTAMINANTE</b>	<b>SIGNOS Y SINTOMAS</b>	<b>SECUELAS</b>	<b>CONC. MAX. PERMISIBLES</b>
<b>BIÓXIDO DE CLORO</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Conjuntivitis.</li> <li>• Rinorrea.</li> <li>• Tos.</li> <li>• Disnea.</li> <li>• Dolor de cabeza.</li> <li>• Vómitos.</li> <li>• Bronquitis</li> </ul>	<p>Los síntomas pueden persistir por varios días.</p>	<p>No hay datos.</p>
<b>BIÓXIDO DE NITRÓGENO</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>LOCALES:</b></li> <li>• Conjuntivitis.</li> <li>• Ulceración corneal.</li> <li>• Irritación de piel.</li>   <li>• <b>RESPIRATORIOS:</b></li> <li>• Dolor en el pecho.</li> <li>• Disnea.</li> <li>• Tos con esputo amarillo o sangre.</li> <li>• Cianosis.</li> <li>• Fiebre.</li> <li>• Respiración asmática.</li> <li>• traqueobronquitis y Bronconeumonía.</li>   <li>• <b>SISTEMA NERVIOSO:</b></li> <li>• Dolor de cabeza.</li> <li>• Vértigo.</li> <li>• Delirio</li> <li>• Inconsciencia.</li>   <li>• <b>GASTROINTESTINALES:</b></li> <li>• Sabor ácido y dolor abdominal.</li> <li>• Náuseas y Vómito.</li>   <li>• <b>CIRCULATORIOS</b></li> <li>• Aumento de velocidad de pulso.</li> <li>• Disminución de la presión sanguínea.</li> <li>• Irregularidad en el ritmo del corazón ( Arritmias cardíacas ).</li>   <li>• <b>INHALACION CRONICA:</b></li> <li>• Dolor de cabeza.</li> <li>• Insomnio.</li> <li>• Ulceras de nariz y boca.</li> <li>• Falta anormal de apetito ( Anorexia ) y digestión difícil y dolorosa ( dispepsia ).</li> <li>• Erosión dental.</li> <li>• Debilidad.</li> <li>• Bronquitis crónica.</li> <li>• Enfisema.</li> </ul>	<p>La recuperación es completa en 4 o 7 días.</p>	<p>5.0 ppm en aire</p>

### 3.2. EFECTOS CONTAMINANTES DEL AIRE EN PLANTAS Y ANIMALES

#### 3.2.1. EN PLANTAS:

Desde la publicación en 1903 del manual de Hasselhoff y Lindau ha habido una tendencia creciente de informes de investigación, revisiones y publicaciones de simposios respecto al tema de la contaminación del aire en relación con las plantas. En base a estudios en Europa se ha encontrado que algunas especies de líquenes ( plantas formadas por la asociación de un hongo y un alga ) no toleran la exposición al SO<sub>2</sub> por encima del límite sugerido por Wentzel y existen muchos informes de su desaparición en los alrededores de las zonas industriales [17].

Se ha sugerido por algunos científicos europeos que algunas especies de líquenes sirvan como plantas "indicadoras" de las concentraciones de SO<sub>2</sub> en el aire de zonas industriales. Esta sugerencia no ha sido tomada en cuenta apesar de que se ha revisado por completo el tema de las plantas "indicadoras" para este y otros contaminantes del aire.

La concentración de 572 µg de SO<sub>2</sub> m<sup>-3</sup> ( 0.20 ppm ) siempre se ha aceptado ampliamente como un límite crítico por debajo del cual la mayoría de las plantas no sufren lesión incluso después de prolongada exposición. Sin embargo, recientemente por experimentos a gran escala realizados en el campo en Alemania, Wentzel sugirió que este límite debería reducirse a 57 µg m<sup>-3</sup> ( 0.020 ppm ). La sugerencia es de considerable importancia, ya que la American Air Quality acepta que la lesión a las plantas ocurre cuando la concentración media en el aire excede 85 µg m<sup>-3</sup> ( 0.030 ppm ) de SO<sub>2</sub>. Actualmente se ha registrado que la concentración media en zonas rurales en Bretaña se aproxima a 50 µg m<sup>-3</sup>.

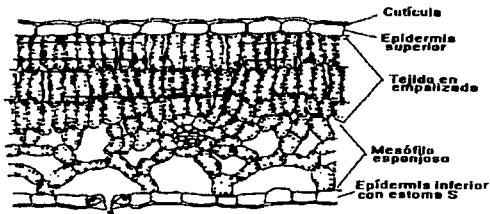
Se han utilizado datos experimentales de unas doscientas especies a concentraciones controladas de SO<sub>2</sub> para clasificar las plantas en tres grupos de acuerdo con la susceptibilidad a la lesión. Se relacionó la resistencia de las plantas con la de la alfalfa, a la que, como planta más susceptible, se le dio el valor de I, en la tabla 31 se observan algunas especies clasificadas en tres grupos en base a la concentración que debe rebasarse antes de que se produzca alguna lesión [17].

TABLA 31  
LIMITE DE TOLERANCIA DE DIVERSAS PLANTAS AL SO<sub>2</sub> [17].

GRUPO	PLANTAS	LIMITES DE TOLERANCIA µg SO <sub>2</sub> m <sup>-3</sup> EN AIRE
I	Alfalfa, trigo, tréboles, avena, cebada y nabo.	430 - 570
II	Centeno, habas, fresas, vegetales frondosos ( excepto la col ), muchas plantas crucíferas y flores ( rosas ).	570 - 860
III	Limonero, papas, col, coníferas y roble	860 - 1140



Uno de los efectos más generales sobre cualquier tipo de planta por el aire contaminado es el de inducir un cambio en su balance de agua lo cual provoca cambios estructurales importantes. Altas concentraciones de dióxido de azufre y flúor en el aire causan el colapso o muerte de todas las células de las hojas de las plantas. En la figura 8 se muestra la anatomía de una hoja típica en su sección transversal.



**FIGURA 8 : Sección Transversal de una Hoja [17].**

La hoja está limitada por una epidermis superior y otra inferior con estoma. La estoma consiste en un par de células guardianas alrededor de un poro elíptico; existen decenas de millones de estomas por centímetro cuadrado de superficie de hoja y el tamaño de poro varía entre las especies ( 9 a 52  $\mu\text{m}$  de longitud y de 2 a 10  $\mu\text{m}$  de ancho ).

Los tejidos externos de la hoja son:

1. El tejido en empalizada; son la capa superior que comprende una o más filas de células alargadas ricas en cloroplastos, separadas por espacios intercelulares estrechos.
2. El mesófilo esponjoso; capa interior de células irregularmente formadas, que contienen pocos cloroplastos y que están separadas por considerables espacios intercelulares estrechos.
3. Tejidos conductores; venas, que llevan agua, sales y metabolitos a través de la hoja.

Las hojas son a menudo, la parte de la planta que primero y más obviamente muestra síntomas visibles de lesión por ser una vía de entrada para los contaminantes gaseosos y como superficie de depósito de partículas.

Algunos contaminantes provocan en las hojas de las plantas pérdida de pigmentación, este efecto ocurre frecuentemente en plantas expuestas a gases de  $\text{SO}_2$ . En la tabla 32 se muestran necrosis presentadas en la mayoría de plantas y vegetales por exposición a contaminantes en el aire.

**TABLA 32**

**NECROSIS SOBRE PLANTAS EXPUESTAS CON AIRE CONTAMINADO [14].**

CONTAMINANTE	NECROSIS
BIÓXIDO DE AZUFRE	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Se presentan manchas claras en sus hojas.</li> </ul>
ÁCIDO SULFÚRICO	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Provoca marcas de manchas tipo viruela sobre la parte superior de las hojas.</li> </ul>
PAN	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Se observa en la parte inferior de la superficie de las hojas una capa de apariencia metálica.</li> </ul>
OZONO	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Provoca fracturas o picoteos en la parte superior de las hojas.</li> </ul>
FLÚOR	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Se colorean de un color café oscuro las puntas de las hojas.</li> </ul>

La fitotoxicidad del smog fotoquímico es muy llamativa, las lesiones características que se han reproducido experimentalmente sólo por la exposición a PAN, son el plateado o bronceado de la superficie inferior de la hoja. El primer síntoma es una hinchazón de las células guardianas en forma de ampollas y esto va seguido con una pronta deshidratación y encogimiento de éstas y de las células mesofilicas que rodean las cavidades de los estomas.

El ozono, que constituye hasta el 90 % de los oxidantes totales en el smog fotoquímico y su concentración puede ser tan alta como 2150 µg m-3 ( 1.0 ppm ) en el aire contaminado, causa síntomas de lesión que son distintos de los descritos anteriormente. Las superficies superiores de las hojas lesionadas presentan lesiones puntuales que inicialmente son de color pardo oscuro o negras pero posteriormente se vuelven blanquecinosas.

La lesión está limitada, al principio, a las células en empalizada superiores, situadas justo debajo de la epidermis superior y puede extenderse para producir nerosis y algunas veces amarilleo y caída de las hojas. Se ha demostrado que el ozono reduce la fotosíntesis, probablemente como resultado del daño a los cloroplastos ; también aumenta la respiración y la permeabilidad de las paredes celulares inferiores.

Aunque la lesión por tiempo frío produce síntomas parecidos a los causados por el ozono, la denominada " mancha del tiempo " del tabaco se imputa ahora normalmente a lesión por ozono, como también el " quemado de las puntas " del pino blanco.

En investigaciones sobre el smog fotoquímico [17], se concluyó que el principal papel del bióxido de nitrógeno fue el de iniciador de las reacciones fotoquímicas y que su concentración en el aire contaminado, normalmente de 410 a 1025 µg m-3 ( de 0.2 a 0.5 ppm ), era demasiado baja para causar lesión a las plantas. Sin embargo, investigaciones recientes efectuadas en la Universidad de California en Riverside, han mostrado que concentraciones ambientales de 615 a 1025 µg m-3 ( de 0.3 a 0.5 ppm ), durante 10 a 22 días, motivaron reducido crecimiento para habas y tomates.

Exposiciones prolongadas a concentraciones que rebasan los 510 µg m-3 ( 0.25 ppm ) fueron nocivas para la naranja; este tipo de investigaciones indican que la repercusión del smog fotoquímico sobre las plantas puede expresarse algunas veces en función de reducciones del crecimiento y rendimiento sin observarse síntomas obvios.

En contraste con la considerable cantidad de información acerca de los efectos del  $\text{SO}_2$  atmosférico en las plantas, existe muy poca información sobre sus efectos en los suelos. En diversas investigaciones se ha encontrado que el pH de la superficie de los suelos es inferior, debido al  $\text{SO}_2$ , siendo el efecto mayor en zonas aproximadas a la fuente de emisión, donde las concentraciones del gas en el aire fueron superiores a los límites establecidos provocando el aumento del contenido de azufre soluble y total de los suelos.

Las características físicas y químicas del suelo influyen en la susceptibilidad de las plantas a la lesión, como Katz [17] encontró que la alfalfa sufrió menos lesiones con  $\text{SO}_2$  cuando crecía con pobre suministro de agua que cuando lo hacía con la adecuada cantidad de agua. La información definitiva es insuficiente para poder confirmar una generalización de este efecto en todas las plantas o vegetales..

Pero lo que si se ha confirmado es que las partículas de los contaminantes pueden provocar efectos severos en la vida de todas las plantas ya que estas generalmente contienen metales tóxicos los cuales provocan daños considerables.

En Noruega se presentaron problemas en sus zonas boscosas de pinos por partículas provenientes de fundidoras de aluminio que se encontraban a varios kilómetros de distancia, donde las corrientes de aire de la zona arrastraron los contaminantes hasta los árboles dañándolos. Este tipo de problemas y pérdidas económicas tanto en las cosechas agrícolas como pérdida de ganado, han estimulado considerablemente los estudios por países europeos de los efectos de contaminantes individuales del aire.

### **3.2.2. EN ANIMALES:**

En países de la Comunidad Económica Europea se han estudiado los efectos de los contaminantes del aire sobre animales pequeños, tales como ratas, ratones y conejos en que estos animales se han expuesto a notables concentraciones de contaminantes específicos del aire para indicar sus toxicidades agudas, siendo la expresión más corriente la de dosis letal o concentración letal que mata el 50 o 100 % de la población.

Los efectos tóxicos en los animales se muestran como cambios químicos, fisiológicos y morfológicos de los tejidos y órganos, pero también pueden ser efectos sensoriales y signos de comportamiento abiertos, que son tan obvios como los síntomas visuales de lesión en las plantas.

Los contaminantes del aire penetran en los animales a través de dos vías principales: la ingestión de material vegetal contaminado y la inhalación. Los contaminantes que penetran por inhalación a través del aparato respiratorio como el  $\text{SO}_2$  causan constricción en los conductos de paso del aire, lo que desencadena tos, mientras que el óxido de nitrógeno y el ozono producen cambios de la capilaridad pulmonar, lo que reduce la absorción.

Otros contaminantes afectan a los vasos sanguíneos bronquiales, de modo que se reduce la absorción a través de la mucosa o del sistema circulatorio sanguíneo más generalmente, de modo que se retrasa la distribución de un compuesto absorbido.

La interferencia con la función de las células macrófagas, que son responsables de la limpieza de materias extrañas en los alvéolos y otros tejidos pulmonares, puede ser otro efecto importante de los contaminantes inhalados.

Estudios de laboratorio efectuados con animales de granja han mostrado que se produce irritación de los ojos después de una exposición de 8 horas a  $14,3 \mu\text{g}$  de  $\text{SO}_2$  m-3 y aparecen síntomas más graves a mayores concentraciones. Además se ha encontrado que los animales enjaulados sufren contaminación del aire causada por ellos mismos, por ejemplo, amoníaco como un contaminante en las granjas de pollo.

Existe poca información acerca de los efectos del smog fotoquímico sobre los animales, pero investigadores de California [17] sugieren que la exposición frecuente a concentraciones de ozono de 108 a 430  $\mu\text{g m}^{-3}$  ( de 0.05 a 0.2 ppm ) puede aumentar la mortalidad en animales con infecciones respiratorias y causar irritación de la mucosa de las vías respiratorias.

Mientras que con exposiciones esporádicas de concentraciones de ozono de 1290 a 1720  $\mu\text{g m}^{-3}$  ( de 0.6 a 0.8 ppm ) provocan sofocación y tos. Aumenta considerablemente la mortalidad de poltuelos recién nacidos cuando se exponen continuamente a concentraciones de 2.15 a 8.60  $\mu\text{g m}^{-3}$  ( de 1.0 a 4.0 ppm ) de ozono y con un tiempo de exposición de 54 ppm-h.

Los óxidos de nitrógeno del smog fotoquímico no están implicados en lesión a los animales de granja, un estudio [17] mostró que los animales ( no se especifica la especie de animal ) expuestos a 8.6 mg/m<sup>3</sup> ( 3.5 ppm ) por 2 horas presentaron infecciones en el sistema respiratorio. Se ha encontrado que el bióxido de nitrógeno . que aveces se produce en los silos durante la fermentación del forraje almacenado que tenga alto contenido de nitrato, es tóxico para los animales de granja, especialmente ganado vacuno y cerdos.

La ingestión por animales de metales pesados y otros elementos en trazas sobre las hojas de las plantas , ha justificado investigaciones en Europa para evitar incrementos de mortalidad en animales por envenenamiento. En un caso de envenenamiento de ganado en una zona aledaña a una fundición de cinc en Noruega, la hierba disponible para pastoreo de los animales contenía, sobre base seca , 3100 ppm de cinc, 700 ppm de plomo y 118 ppm de cobre.

Analizando el mismo tipo de hierbas para pastoreo no expuestas a los polvos contaminantes se encontró que tenían 38.2 ppm de cobre y 6 ppm de plomo, mostrando el impacto ecológico de la fundidora en la hierba y los animales . El gobierno noruego pidió a la fundidora la instalación de sistemas para reducir la emisión de las partículas contaminantes.

En estudios recientes [17] se han mostrado grandes aumentos de los contenidos de cinc, plomo, cobre, cadmio y níquel en el heno y hierba que crece a favor del viento en un complejo urbano-industrial. Se atribuyeron estos aumentos a polvos que provienen de residuos, suelos contaminados y en parte de la actividad industrial diaria.

Un caballo que ingirió hierba y heno contaminados sufrió intoxicación por plomo. El plomo en polvos ha causado toxicidad en animales en otras zonas limitadas, cuando también tienen níquel, molibdeno, vanadio y arsénico.

Es evidente que la agricultura., la horticultura y las actividades forestales tienen vital interés en mantener el aire como un recurso limpio y sano, debido a que pueden sufrir pérdidas achacables a la contaminación del aire. Corresponde a toda la población y en especial a los gobiernos emitir o modificar leyes ecológicas que permitan controlar las emisiones al aire por fuentes industriales para disminuir o eliminar las lesiones a las plantas de cosechas, árboles y animales causadas por la contaminación del aire

# IV

**EQUIPOS PARA CONTROL DE  
EMISIONES CONTAMINANTES  
EN LOS HORNOS PARA VIDRIO**

## CAPITULO IV

### EQUIPOS PARA CONTROL DE EMISIONES CONTAMINANTES EN LOS HORNOS PARA VIDRIOS

El primer control de emisiones en la industria del vidrio fue en 1874 en Gran Bretaña. En Alemania el primer control de emisiones registrado fue en 1913 por la compañía GmbH, usando el primer precipitador electrostático y en 1965 empezó la construcción de la primera planta para el tratamiento de emisiones generadas por la fundición de vidrio, utilizando combustible fósil.

Para la industria del vidrio existen varias alternativas para reducir con gran eficiencia las emisiones, los Ingenieros y Técnicos deben tener la visión de considerar cual es el sistema más adecuado para sus necesidades de proceso, que pueda reducir las emisiones contaminantes más de lo establecido por las normas de emisiones actuales, ya que en el futuro los límites establecidos en las normas cada vez serán más estrictos.

La selección, diseño y modificación de la unidad anticontaminante no sólo depende del equilibrio químico y de la cinética de las correspondientes reacciones químicas, si no también de las propiedades físicas de transporte de las diversas especies que intervienen. Estos fenómenos de transporte son comunes a todos los procesos e incluyen los efectos de la transferencia de materia y calor.

Los factores económicos repercutirán también en la selección del tipo de equipo reductor de emisiones y pueden limitar el diseño de determinadas unidades. Se encuentra que mientras la teoría puede ser útil para ayudar a comprender las características de los diferentes sistemas, los diseños comerciales actuales que existen en la industria del vidrio se basan casi por completo en la experiencia práctica.

En la industria del vidrio la reducción de emisiones contaminantes puede realizarse por dos métodos diferentes:

1. Métodos Primarios.
2. Métodos Secundarios.

Los métodos primarios se les denomina a todos aquellos que sirven para prevenir la generación de emisiones contaminantes, para la industria del vidrio tenemos por ejemplo:

- Obtener bajas velocidades de gases de combustión.
- Trabajar con temperaturas de fundición lo más bajas que se pueda.
- Reducir el exceso de oxígeno en el horno.
- Utilizar combustibles más puros.
- Utilizar sistemas de combustión eficientes.
- Seleccionar el tipo de horno de fundición.
- Utilizar altos porcentajes de pedacería de vidrio en la carga.
- Humedecer adecuadamente la carga.
- Mezclar las materias primas en la secuencia adecuada.

Los métodos secundarios involucran los sistemas o equipos utilizados para reducir o eliminar las emisiones contaminantes que genera el proceso al producir el vidrio. En este caso se cuenta con una gran variedad de equipos anticontaminantes como:

- Cámaras de sedimentación.
- Colectores por inercia.
- Precipitadores electrostáticos.
- Filtración.
- Lavadores y absorbedores húmedos.

En los métodos secundarios no solo hay que tomar en consideración el costo que implica la compra de los equipos, sistemas de control y toda la tecnología necesaria. Hay que considerar el costo ocasionado en forma permanente por el mantenimiento preventivo del sistema, compra de refacciones y capacitación del personal.

#### **4.1. MÉTODOS PRIMARIOS**

La formación de los óxidos de nitrógeno (NOx) en los hornos de fusión de vidrio principalmente está relacionada con la temperatura de flama, temperaturas altas de fusión con un tiempo de residencia alto y condiciones inadecuadas de combustión.

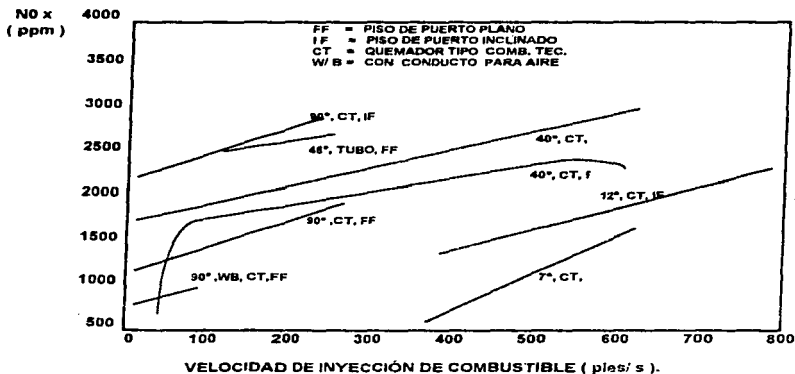
El principio básico de la reducción de NOx involucra una reducción de la temperatura de flama que se logra controlando la velocidad de inyección de combustible. Al reducir la velocidad de inyección de combustible se busca que el horno tenga flamas largas consistentes, con satisfactoria geometría y una completa combustión en la unidad de fundición.

Combustión Tec. Inc. [18] muestra el efecto de la inyección de gas sobre las emisiones de NOx en la figura 9, los NOx están expresados en ppm a 0 % O<sub>2</sub>. Se observa que la inyección a altas velocidades del aire de combustión con el combustible, intensifican la mezcla aire-combustible produciendo emisiones altas en NOx. Estas velocidades sin embargo, están relacionadas con el método de inyección del combustible dentro del flujo de aire.

Si la relación entre el ángulo de posición del quemador y la velocidad del aire del puerto incrementa la intensidad de mezclado aire-combustible, el resultado será emisiones de NOx altas, pero si esta relación reduce la intensidad de mezclado como se muestra en la figura 9: el caso de 90°.WB,CT,FF, se observan bajas emisiones de NOx.

Con quemadores a 45° en un horno de puertos laterales y velocidades medias de combustible se originan emisiones bajas de NOx. En el caso de velocidades altas de combustible en un horno de puertos traseros y quemadores de 45° se promueve mayormente la intensidad del mezclado aire-combustible y por lo tanto niveles más altos de NOx que el de un horno del tipo de puertos traseros con velocidades altas de combustible.

Con quemadores debajo del puerto en un horno de puertos traseros, el contacto entre el aire y el gas se retrasa lo cual significa una menor intensidad de mezclado y por lo tanto bajas emisiones de NOx.



**FIGURA 9 : Efecto de la Velocidad de Inyección de Combustible Sobre las Emisiones de NOx**

Latchford Glass [18] en California realizó cambios en condiciones de operación en tres de sus hornos ( A, C y D ) para reducir emisiones de NOx y aumentar la producción de vidrio para cada horno.

En el horno "A" de puertos laterales, produciendo vidrio plano usando 23 % de cullet, con estable y buena geometría de flama se realizó cambios en la velocidad de inyección de combustible promedio en quemadores de 686 a 536 pies / segundo como se muestra en la tabla 33, obteniéndose una reducción de NOx del 27 % y un incremento en producción de 18 toneladas por día de vidrio además de una reducción de oxígeno de 2.5 a 1.8 %.

Al horno "C" de puertos laterales, produciendo vidrio de color ámbar usando 70 % cullet, se le disminuyó la velocidad de inyección de combustible de 545 a 408 pies/s promedio, como se observa en la tabla 35. Se obtuvo una reducción de emisiones del 29 % de NOx de un lado y 10 % del otro, el estraje se mantuvo igual.

Al horno "D" de puertos traseros, produciendo vidrio plano y usando 20 % cullet, se realizó una reducción en la inyección de combustible de 497 a 414 pies / segundo promedio como se observa en la tabla 35. En este caso no se observa disminución en la concentración de NOx, pero si hay un incremento en el estraje y una reducción de 2.4 a 1.8 % de oxígeno. De sus cambios de operación realizados en sus hornos Latchford Glass concluye que son tres cambios los que ayudan a disminuir las emisiones de NOx:

1. Disminuir la velocidad de inyección de combustible.
2. Operar el horno con un mínimo de exceso de aire de combustión
3. Utilizar ángulos de inclinación en quemadores para minimizar temperaturas de flama y reducir emisiones de NOx.



TABLA 33

CAMBIOS EN CONDICIONES Y REDUCCIÓN DE NOx PARA EL HORNO " A "

DESCRIPCION	UNIDADES	NÚMERO DE QUEMADORES							
		CONDICIONES ANTES DE AJUSTE				CONDICIONES DESPUÉS DE AJUSTE			
		Producción 122 Ton/día				Producción 140 Ton/día			
		1	2	3	4	1	2	3	4
PRESIÓN DE GAS	lb/plg2	2.6	3.0	3.0	4.5	1.3	2.5	1.7	2.7
QUEMADOR									
Volumen	pie3/h x 10-3	8.80	17.16	13.52	12.48	10.64	18.36	13.83	15.17
Velocidad	pie/s.	590.0	645.0	668.0	832.0	400.0	537.0	519.0	648.0
Ángulo	grados ( ° )	-1.0	-2.0	-2.0	-1.0	-1.0	-2.0	-2.0	-1.0
VELOCIDAD EN PUERTOS	pie/s.	18.7	-	-	-	18.7	-	-	-
COMBUSTIBLE	%	34.0	66.0	52.0	48.0	37.0	63.0	48.0	52.0
OXÍGENO	%	2.5	-	-	-	1.8	-	-	-
EMISIÓN DE NOx	ppm	800.0	-	-	-	760.0	-	630.0	-

**TABLA 34**

**CAMBIOS EN CONDICIONES Y REDUCCIÓN DE NOx PARA EL HORNO "C"**

DESCRIPCION	UNIDADES	NÚMERO DE QUEMADORES							
		CONDICIONES ANTES DE AJUSTE				CONDICIONES DESPUÉS DE AJUSTE			
		Producción 136 Ton/día				Producción 127 Ton/día			
		1	2	3	4	1	2	3	4
PRESIÓN DE GAS	lb/pig2	3.5	3.0	3.0	1.7	1.1	1.7	2.6	1.7
QUEMADOR									
Volumen	pie3/h x 10-3	7.37	12.63	14.48	5.52	6.11	13.70	13.46	6.34
Velocidad	pie/s.	681.0	624.0	476.0	367.0	348.0	424.0	443.0	360.0
Ángulo	grados (°)	-1.0	-3.0	0.0	-2.0	-2.0	-2.0	-2.0	-2.0
VELOCIDAD EN PUERTOS	pie/s.	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0
COMBUSTIBLE	%	34.0	66.0	52.0	48.0	37.0	63.0	48.0	52.0
OXÍGENO	%	37.0	63.0	72.0	28.0	31.0	69.0	68.0	32.0
EMISIÓN DE NOx	ppm	650.0	-	480.0	-	480.0	-	420.0	-

TABLA 35

CAMBIOS EN CONDICIONES Y REDUCCIÓN DE NOx PARA EL HORNO " D "

DESCRIPCION	UNIDADES	NÚMERO DE QUEMADORES											
		CONDICIONES ANTES DE AJUSTE						CONDICIONES DESPUÉS DE AJUSTE					
		Producción 229 Ton/día						Producción 240 Ton/día					
		1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
PRESIÓN DE GAS	lb/plg2	3.6	3.8	1.7	5.2	4.5	3.6	3.2	3.1	2.2	-	-	-
QUEMADOR	pie3/h x 10-3	14.3	14.2	7.4	8.9	13.1	14.5	12.6	14.4	8.0	8.8	13.7	12.5
Volumen	pie/s.	515.0	534.0	334.0	350.0	577.0	544.0	348.0	398.0	421.0	378.0	510.0	416.0
Velocidad	grados ( ° )	-0.0	-3.0	+1.0	-1.0	+1.0	+1.0	-1.0	-1.0	+1.0	+1.0	-1.0	0.0
VELOCIDAD EN PUERTOS	pie/s.	46.1	-	-	-	-	-	46.1	-	-	-	-	-
COMBUSTIBLE	%	40.0	40.0	20.0	25.0	36.0	40.0	36.0	41.0	23.0	25.0	39.0	36.0
OXÍGENO	%	2.4	-	-	-	-	-	1.6	-	-	-	-	-
EMISIÓN DE NOx	ppm	350.0	-	-	-	-	-	350.0	-	-	-	-	-

Otros métodos primarios son el control de exceso de aire y la temperatura del aire precalentado que tienen un efecto importante en las emisiones de  $\text{NO}_x$ , como se muestra en la figura 10 y 11 donde los datos se derivan de hornos con diferente sistema de combustión.

$\text{NO}_x$   
Concentración  
(  $\text{g}/\text{Nm}^3$  )

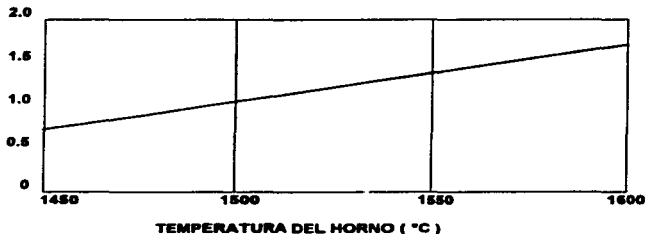


FIGURA 10 : Concentración Relativa de  $\text{NO}_x$  vs. Temperatura del Horno ( °C ) [10].

$\text{NO}_x$   
Concentración  
(  $\text{g}/\text{Nm}^3$  )

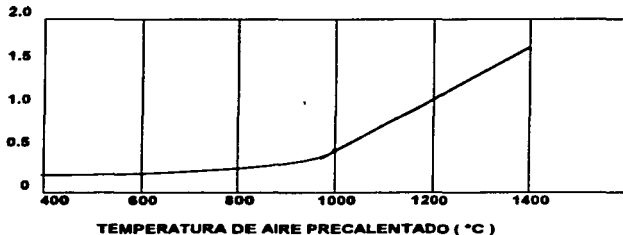


FIGURA 11 : Concentración Relativa de  $\text{NO}_x$  vs. Temperatura de Aire Precalentado ( °C ) [10].

Como se observa en la figura 11 la temperatura del aire precalentado tiene un efecto considerable en las emisiones de NO<sub>x</sub>, ya que a mayor temperatura de aire precalentado mayor son las emisiones de NO<sub>x</sub>. Por lo que se recomienda bajar la temperatura del aire precalentado, hasta donde no se vea afectada considerablemente la eficiencia del horno de fusión de vidrio.

El utilizar diferentes tipos de combustible en la fusión de vidrio produce diferentes niveles de emisiones de NO<sub>x</sub> como se muestra en la tabla 36, donde se observa que al utilizar combustóleo generalmente se producen emisiones de NO<sub>x</sub> menores que cuando se emplea gas natural. En parte esto se debe a que la alta luminosidad de las flamas que provoca el combustóleo tienen una temperatura de flama menor a la de las producidas con gas.

**TABLA 36**  
**RANGO REPRESENTATIVO DE EMISIONES DE NO<sub>x</sub> ( g/Nm<sup>3</sup> )**

TIPO DE HORNO	COMBUSTOLEO	GAS NATURAL
Regenerativo Puertos traseros.	1.0 - 2.4	1.4 - 3.0
Regenerativo Puertos Laterales.	1.6 - 3.6	1.6 - 4.0

La utilización de quemadores especiales para prevenir la generación de emisiones contaminantes ha adquirido en la industria vidriera un gran interés, por las ventajas que ofrece la variedad de diseños que existen , los que se pueden acoplar a las necesidades requeridas en los distintos tipos de hornos de fundición de vidrio.

Combustión Tec. Inc. ( Orlando, Florida ) y el Institute of Gas Technology [19] muestran un sistema de quemadores para utilizar en hornos de fundición de vidrio , reduciendo considerablemente las emisiones de NO<sub>x</sub> utilizando gas natural.

Este sistema ofrece la reducción de un 35 % o más de emisiones de NO<sub>x</sub> y el ahorro de un 6 % de combustible ( gas natural ). El sistema involucra el uso de un " Cracker ", el cual es una cámara de combustión diseñada para trabajar con gas natural promoviendo la formación de partículas de cenizas y otros productos de combustión.

EL 25 % de combustible utilizado en el horno es pasado por el seno del " Cracker " para producir partículas de cenizas, las cuales son reblandecidas con el 75 % de combustible restante, generando partículas de cenizas ricas en combustible a una temperatura de 290 °C , que servirán para alimentar los quemadores.

El " Cracking " es independiente del sistema de combustión ya que cuenta con un bypass diseñado para facilitar su instalación y poder darle fácil limpieza y mantenimiento, además de poder utilizar el horno con o sin el sistema " Cracking ".

La ventaja de utilizar este sistema es que incrementa el CO<sub>2</sub> se produce una flama con alta energía cinética, por lo tanto provoca una mayor transferencia de calor de la flama al fundidor, ahorrando combustible en el proceso de fundición del vidrio. Otra ventaja es que al disminuir el consumo de combustible un 6.5 %, por lograr una mayor eficiencia térmica en el horno, se puede reducir hasta un 35 % las emisiones de NO<sub>x</sub>.

En la figura 12 se muestran las emisiones de NOx en relación con la velocidad de combustible utilizando en el horno con el sistema " Cracking " y sin él. Los datos fueron obtenidos de un horno de puertos laterales a 45°, utilizando un exceso de oxígeno de 2.5 % y con una temperatura de aire de combustión de 1160 °C aproximadamente.

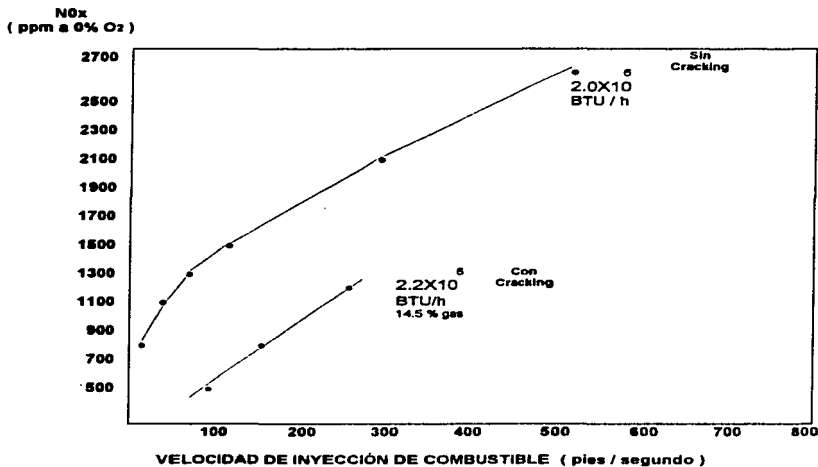


FIGURA 12 : Emisión de NOx vs. Velocidad de inyección de combustible utilizando el sistema " Cracking " [18].

Utilizando quemadores con el sistema Cracking un horno que funde vidrio para fabricar envases en el sureste de California, con emisiones de 5.5 libras de NOx por tonelada de vidrio producido ( 1,100 ppm de NOx ), redujo con el nuevo sistema a 3.5 libras de NOx por tonelada de vidrio producido ( 700 ppm de NOx ).

#### 4.1.1. CRITERIO DE SELECCIÓN PARA HORNO DE FUSIÓN

La experiencia de King Taudevin & Gregson Ltd ( K.T.G ) [20] como diseñadores y constructores de hornos, se utiliza para formular guías para la selección del tipo de horno y fuente de energía a utilizar en la industria del vidrio con el objeto de producir emisiones contaminantes por debajo o en los intervalos establecidos en las legislaciones ambientales locales o internacionales. Factores de mayor importancia a considerar son:

1. Tipo de vidrio a fundir.
2. Extracción diaria ( Toneladas de vidrio producidas por día ).
3. Tipo de materias primas a utilizar.
4. Disponibilidad y costo de fuentes de energía.
5. Seguridad de fuente energética.
6. Ubicación de la planta.
7. Espacio disponible.

Los puntos 1 y 2 son fáciles de determinar y dependen de los resultados obtenidos en los estudios de mercado, el punto 3 está sujeto a las materias primas disponibles y finalmente el punto 4 al 7, deben ser definidos y aplicados en un estudio para establecer el mejor tipo de horno de fusión según el criterio de selección.

El criterio de selección se hará principalmente sobre la base de costos de combustible por tonelada de vidrio, la selección básicamente es entre las siguientes fuentes de energía:

1. Combustible fósil
2. Electricidad
3. Combustible fósil + ayuda eléctrica

##### 4.1.1.1. HORNOS CON COMBUSTIBLE FÓSIL

En dichos hornos la combustión es por medio de petróleo ( Combustóleo, Diesel y Gasóleo ) o gas natural. Existe una gran gama de diseños los cuales varían según su eficiencia en la recuperación de calor procedente de la fusión [20].

Una relación de consumos típicos de combustible permite una clasificación básica de dichos diseños:

<b>Tipo de Horno</b>	<b>Consumo de Combustible por Tonelada de Vidrio ( kg aceite )</b>
Sin recuperación de calor	270 - 300
Recuperador ( Metal )	200 - 250
Recuperador ( Cerámico )	180 - 190
Regenerador	115 - 150

Los consumos citados arriba no reflejan consecuentes ahorros de energía al usar calderas, etc. Varios Hornos típicos de K.T.G., están reproducidos en las figuras 13, 14, 15 y 16.

Como se observa es evidente usar un recuperador o regenerador de calor para reducir el consumo de energía y por lo tanto las emisiones contaminantes. El tipo de regenerador dependerá del área del horno, plan de planta y costo de construcción.

Para extracciones superiores a 200 toneladas diarias, un horno de quemadores transversales con regeneradores verticales es el más indicado. Para extracciones inferiores a 200 toneladas diarias se prefiere un horno de llama en herradura y los regeneradores pueden ser verticales u horizontales ( paso único o múltiple ).

En cualquiera de los casos mencionados, una proporción mayor de 4.5 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> entre volumen de regenerador y área de fusión puede ocasionar que el regenerador no sea lo eficiente que se espera por estar sobrado en volumen; en base a la experiencia práctica se indica que es más favorable una proporción un poco menor ( 4.0 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> ).

Con refractarios modernos y adecuada construcción se puede obtener una vida útil más larga del regenerador, ya que su costo inicial es elevado, siendo rentable a largo plazo por el ahorro considerable de combustible y el de asegurar la permanencia de la planta en su localidad al cumplir los límites de emisiones de contaminantes establecidos.

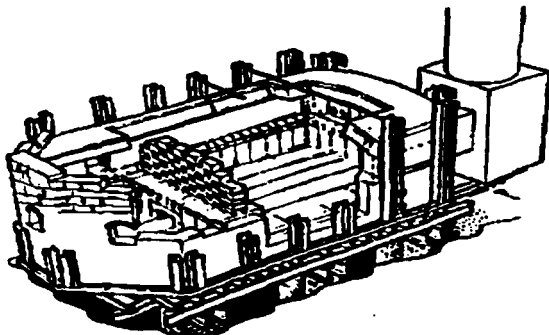
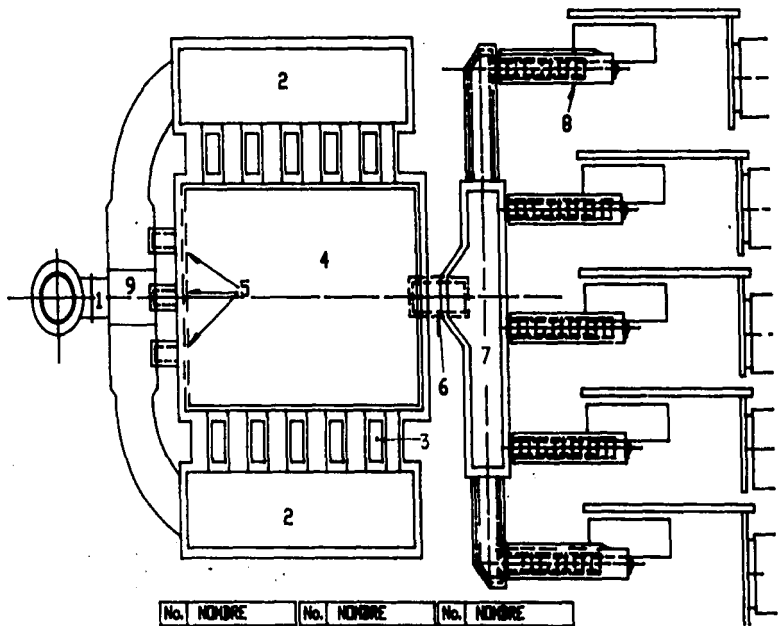


FIGURA 13 : Horno con Recuperador Metálico [20].



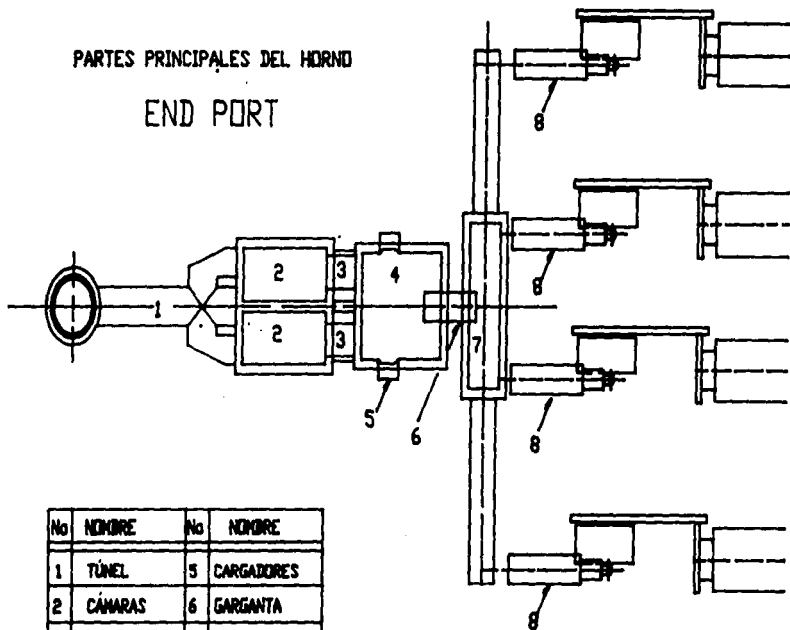


No.	NOMBRE	No.	NOMBRE	No.	NOMBRE
1	TÚNEL	4	FUNDIDOR	7	REFINADOR
2	CÁMARAS	5	CARGADORES	8	CHORREADORES
3	PUERTOS	6	GARGANTA	9	VALVULA DE CAMBIOS

FIGURA 14 : Horno de Puertos Laterales ( Side Port ) [2]

PARTES PRINCIPALES DEL HORNO

END PORT



No	NOMBRE	No	NOMBRE
1	TÚNEL	5	CARGADORES
2	CÁMARAS	6	GARGANTA
3	PUERTOS	7	REFINADOR
4	FUNDIDOR	8	CHORREADORES

FIGURA 15 : Horno de Puertos Atrás ( End Port ) [2]

UBICACION DE ELECTRODOS  
EN UN HORNO ELECTRICO

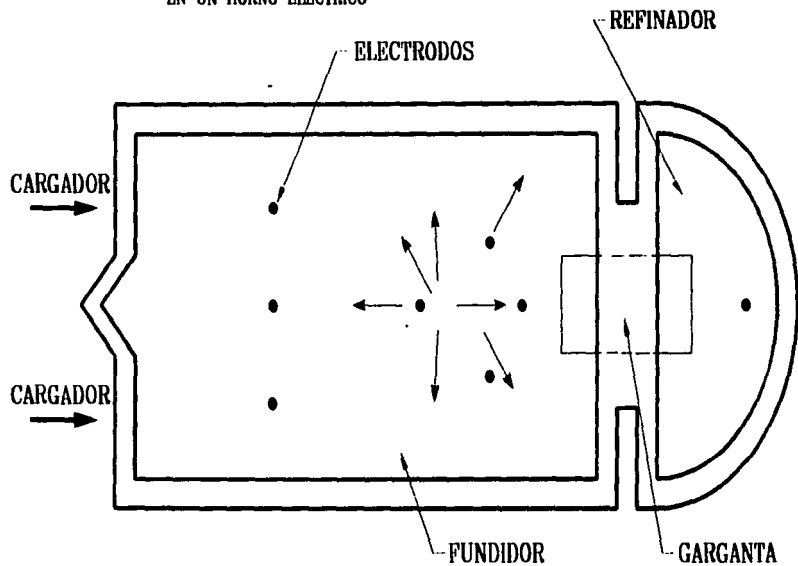


FIGURA 16 : Homo Tipo Eléctrico [2]

#### 4.1.1.2. HORNOS CON COMBUSTIBLE FÓSIL Y AYUDA ELÉCTRICA

El efecto " Joule " de calentamiento directo por medio de electricidad puede ser introducido en el vidrio mediante la instalación de electrodos. Normalmente la ayuda eléctrica ( Boosting ) se aplica para obtener mayor extracción de un horno en funcionamiento o también si se desea un horno de fusión mixta. Ciertamente el consumo de energía eléctrica depende del color y tipo de vidrio, pero generalmente es del orden de 550 a 700 Kw/h por tonelada de vidrio.

A continuación en la tabla 37 se indica un consumo típico en un horno con ayuda eléctrica para un vidrio del tipo soda-cálcico-silíceo de color verde esmeralda para envases:

**TABLA 37**  
**CONSUMO TÍPICO EN HORNO CON AYUDA ELÉCTRICA [20].**

ÁREA DE FUSIÓN ( m <sup>2</sup> )	TAMAÑO DE BOOSTING KVA	EXTRACCIÓN DE VIDRIO Ton / día	CONSUMO POR	TONELADA DE	VIDRIO
			COMBUSTIBLE kg.	ELECTRICIDAD Kw/h	TOTAL Kcal.
40	-	100	125	-	1.32X10 <sup>6</sup>
40	1200	145	86	199	1.07X10 <sup>6</sup>

Como se observa en la tabla anterior con la misma área de fusión incluyendo ayuda eléctrica se obtiene un incremento en la extracción del 45 % y una reducción del 31 % en consumo de combustible fósil, pero se genera un consumo de 199 kw/h de energía la cual implica un " costo ". Aún así se logra un ahorro de energía total por tonelada de vidrio de 250,000 Kcal.

Este " costo " por utilizar ayuda eléctrica en la actualidad en muchos hornos de vidrio en Europa es absorbido por la generación de energía eléctrica en las mismas plantas aprovechando los gases que salen de las chimeneas ( 700 a 850 °C ) para generar vapor, el cual es utilizado en una turbina para producir energía eléctrica.

HEYE GLAS en Oberkirchen, Alemania [21] tiene funcionando un horno de fundición de vidrio con un sistema de recuperadores de calor ( materiales metálicos resistentes a altas temperaturas con 27 % de cromo ), que precalienta el aire de combustión ( 600 - 800 °C ) para los quemadores y aprovecha la temperatura de los gases de combustión ( 1300 °C ) generando energía eléctrica. Esta energía se emplea como ayuda eléctrica en el tanque de trabajo.

El horno tipo HEYE con una área de fundición de 70.2 m<sup>2</sup> puede producir 285 toneladas /día, con ayuda eléctrica se puede lograr con la misma área de fundición un incremento de producción de 320 toneladas /día. Un incremento del 12 % en el estiraje

HEYE GLAS reporta que del 100 % de energía utilizada en su horno el 28 % aproximadamente se utiliza para precalentar el aire de combustión, el 47 % se utiliza para fundir vidrio y aunque todo el horno y recuperador tienen aislamiento existe una pérdida por radiación del sistema del 19 % y un 6 % de pérdidas de gases del flujo por la chimenea. En la tabla 38, se resume el porcentaje de energía utilizada y perdida en el horno para fundir vidrio con recuperadores de calor para precalentar aire de combustión y sistema para generar energía eléctrica.

**TABLA 38**

**PORCIENTO DE ENERGÍA EMPLEADA EN HORNO DE FUNDICIÓN DE VIDRIO  
CON RECUPERADOR DE CALOR Y AYUDA ELÉCTRICA TIPO HEYE [21].**

DESCRIPCIÓN	% ENERGÍA TOTAL	% ENERGÍA CONSUMIDA	% ENERGÍA PERDIDA
Gas natural	94	-	-
Ayuda eléctrica	6	-	-
Pre calentamiento de aire de combustión	-	28	-
Pérdida de gases	-	-	8
Energía consumida en la planta	-	0.5	-
Calor condensado	-	-	19.5
Fundición de vidrio	-	47	-
Pérdidas por radiación del horno	-	-	19
Pérdidas de gases del flujo por la chimenea	-	-	6
<b>TOTAL</b>	<b>100</b>	<b>75</b>	<b>25</b>

Un horno típico regenerativo con puertos laterales o traseros con una temperatura de aire precalentado de 1300 °C produce emisiones de 3500 mg de NOx/m<sup>3</sup> ( 8% de O<sub>2</sub> ), el horno HEYE con una temperatura de aire precalentado de 800 °C produce emisiones de 1200 mg de NOx/m<sup>3</sup> ( 8% de O<sub>2</sub> ), lo que representa una reducción de casi el 65 % de emisiones de NOx.

HEYE GLAS reporta que puede reducir las emisiones hasta 400 mg NOx/m<sup>3</sup>, usando una temperatura de aire precalentado de 600 °C y un 0.2 % de exceso de oxígeno en la atmósfera del horno. HEYE GLAS realiza un estudio del consumo de energía en 1991 de uno de sus hornos y en la tabla 39 se reporta la hoja de trabajo del sistema HEYE.

**TABLA 39**

**HOJA DE TRABAJO DE HORNO HEYE GLAS FABRIK [39].**

<b>HORNO</b>	Tipo HEYE con recuperador de calor y generación de gases de combustión con una temperatura de 800 °C.
<b>CAPACIDAD</b>	320 toneladas de vidrio por día.
<b>TIPO DE VIDRIO</b>	Calizo para envases de color verde
<b>ENERGÍA TOTAL:</b>	Gas natural ( 8600 Kcal/Nm <sup>3</sup> ) = 94% Ayuda de energía eléctrica = 6 %
<b>CONSUMO DE GAS NATURAL:</b>	1530 Nm <sup>3</sup> /h
<b>CONDICIONES DE GASES:</b>	30 bar , 430 °C.
<b>GENERACIÓN DE GASES:</b>	5500 kg/h
<b>PRODUCCIÓN DE ELECTRICIDAD</b>	1000 kw/h

Para el anterior horno, el consumo de energía en relación a la cantidad de vidrio fundido es de 985 Kcal/kg de vidrio fundido.

#### 4.1.1.3. HORNOS ELÉCTRICOS

Actualmente existen muchos hornos completamente eléctricos de K.T.G fundiendo una gran variedad de vidrios. Este tipo de hornos tienen una área de fundición menor, comparada a la de los hornos típicos de fusión de vidrio. El consumo total de energía depende del área de fusión y del tipo de vidrio, como se observa en los siguientes datos:

Tipo de Vidrio	Kw/h/ Ton de vidrio fundido
Cristal al plomo ( 24 % )	800
Opal fluorhídrico	800
Sodio-cálcico-silica	650
Borosilicato	850

La ventaja de un horno todo eléctrico es que las emisiones de NOx y SOx son casi nulas y sólo se tienen ligeros problemas con partículas, además es más barato en su construcción por no necesitar regeneradores o recuperadores de calor, sin embargo una desventaja es que el período de campaña es comparativamente menor ( de 2 a 3 años para vidrios sodico-cálcico-silica ) en relación a sistemas regenerativos ( 5 a 8 años ) y la desventaja más importante es el impacto del costo de la energía eléctrica.

Para poder seleccionar adecuadamente el horno de vidrio K.T.G muestra en la tabla 40 un estudio [20] para varios tipos de hornos para la producción de envases de vidrio, con una extracción de 60 Ton/día, en este estudio están incluidos los gastos de construcción, chimenea y canales pero se excluyen los costos de ingeniería civil y suministros, los costos de combustibles fueron calculados en base a proyecciones locales ( Inglaterra ), todos los costos son en libras esterlinas.

**TABLA 40**  
**COMPARACIÓN DE COSTOS PARA VARIOS TIPOS DE HORNOS**  
**DE UNA EXTRACCIÓN DE 60 TONELADAS POR DÍA [20].**

DESCRIPCIÓN	TODO ELÉCTRICO	FUSIÓN MIXTA	COMBUSTIBLE FÓSIL SOLO
Costo de construcción	530,000	540,000	910,000
Costo anual de energía de fusión.	290,000	260,000	160,000
Campaña* ( años )	2 a 3	4 a 6	5 a 6
Costo de reconstrucción	186,000	175,000	254,000

\* Campaña: Período que dura funcionando el horno de fusión en buenas condiciones.

En conclusión, se observa que el horno de fusión mixta es la opción más adecuada en costo, sin embargo debido a consideraciones ambientales de la localidad en Inglaterra la opción de hornos de tipo eléctricos fue la selección adoptada.

#### 4.1.2. ADECUACIONES EN MATERIAS PRIMAS

La industria vidriera utiliza materias primas en forma sólida con tamaño de partícula que producen importantes cantidades de emisiones a la atmósfera. En vidrios calizos, los componentes principales utilizados son Arena Silica, Feldespato, Caliza y Soda Ash.

Estos materiales son mezclados e introducidos al horno para producir vidrio. El no tener un buen mezclado y por lo tanto una buena homogeneización puede causar segregación al transportar la carga al horno, las partículas finas de Soda Ash y Caliza pueden contribuir a la saturación de los colectores de polvos y a la formación de "Carry-Over" en las cámaras regeneradoras de calor, puertos o recuperadores de calor. Lo anterior origina emisiones de partículas a la atmósfera.

Richard L. Lehman y William H. Manning [22] del departamento de tecnología de vidrio de una compañía que produce Fibra de Vidrio en Toledo E.U.A., realizaron estudios importantes para disminuir las emisiones de partículas humedeciendo adecuadamente la carga. Sugieren humedecer la mezcla con agua a una temperatura no menor de los 35.4 °C, esta condición es importante ya que a temperaturas menores se favorece la formación de Heptahidratos ( $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ) que absorben el 54.3 % de agua y/o Decahidratos ( $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ) que absorben 62.9 % agua, como se muestra en el diagrama de fases de la figura 17.

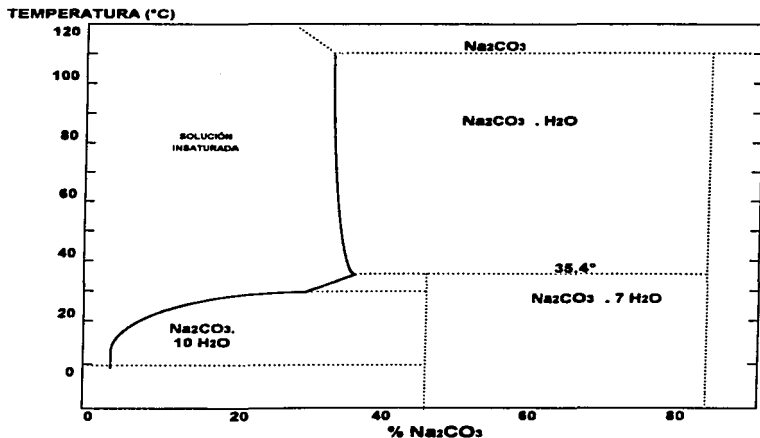


FIGURA 17 : Diagrama de Fases de  $\text{Na}_2\text{CO}_3 - \text{H}_2\text{O}$

A temperaturas mayores de 35.4 °C la fase estable es la de monohidratada ( $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ), la cual sólo absorbe el 14 % de agua, minimizando la cantidad de agua pérdida por hidratación e incrementando en un 73 % la eficiencia de humidificación de la carga.

En la fase del monohidrato también tenemos carbonato de sodio en solución que ayuda a que la Soda Ash tenga una mejor dispersión de álcalis en toda la carga, ayudando a que los finos se aglomeren en forma más eficiente en la carga húmeda, reduciendo la necesidad de instalar equipo recolector de partículas en el equipo dosificador de carga y minimizar las emisiones de partículas por las chimeneas del horno al disminuir la formación del "Cary-Over".

La uniformidad y calidad de humidificación de la carga se encuentra influenciada por la cantidad adicionada de agua, porcentaje de vidrio foráneo o propio y la secuencia en que los componentes principales son adicionados a la carga para su mezclado.

La tabla 41 contiene los resultados que muestran cual es la mejor secuencia de pesado de los ingredientes mayores y el momento de adición ideal de agua a la carga. Como se observa en la tabla 41 no sólo es importante que se obtenga buena aglomeración de finos en nuestra mezcla, si no que la calidad de la mezcla sea buena.

**TABLA 41**

**SECUENCIA DE HUMIDIFICACIÓN Y PESADO EN LA ELABORACIÓN DE LA CARGA [22].**

SECUENCIA DE MEZCLADO	% AGLOMERACIÓN DE FINOS	OBSERVACIONES
1.- A+W+S+C+I	87	Uniforme y muy buen manejo de finos. Calidad de mezcla buena.
2.- S+C+W+A+I	75	Poca aglomeración y problemas de finos en equipo dosificador de carga.
3.- A+I+W+S+C	85	La homogeneidad en carga no es uniforme como en la secuencia N°1.
4.- A+S+C+W+I	85	Formación de piedras y calidad de mezcla deficiente.
5.- A+S+C+I+W	86	El contacto entre Soda Ash y Arena Sílica no es buena, se obtiene calidad de mezcla regular.
<b>A = Arena Sílica    C = Caliza    I = Ingredientes Menores    S = Soda Ash    W = Agua</b>		

La calidad de la mezcla es el grado de homogeneización de la mezcla y se determina en forma química analizando el %  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  y el % Caliza por medio de técnicas de análisis químicos sencillos, registrando los datos en una gráfica con el fin de controlar los datos obtenidos en los rangos permisibles de variación y poder de esta forma determinar en forma práctica la cantidad de agua ideal que se tiene que adicionar a la carga y el tiempo de mezclado adecuado que se requiere para obtener condiciones como las de la secuencia de mezclado número "1" de la tabla 41.



## 4.2. MÉTODOS SECUNDARIOS

Se usan muchos tipos de equipos industriales para el control o eliminación de emisiones contaminantes en la industria en general. Pero los más frecuentes en la industria vidriera se agrupan en seis clases diferentes, según el principio en que se basa el proceso de separación:

1. Cámaras de Sedimentación.
2. Colectores por inercia, incluidos ciclones.
3. Precipitadores electrostáticos.
4. Filtración a través de un medio poroso.
5. Lavadores y absorbedores húmedos.
6. Aglomeradores sónicos.

### 4.2.1. CÁMARAS DE SEDIMENTACIÓN [23].

Estos equipos se basan en el hecho de que las partículas sólidas o líquidas suspendidas en un gas caen a través de este bajo la acción de la gravedad, a una velocidad que depende del tamaño de las partículas, su densidad y su forma. Además de la densidad y viscosidad del gas, en la figura 18 se muestra un tipo práctico de cámara de sedimentación:

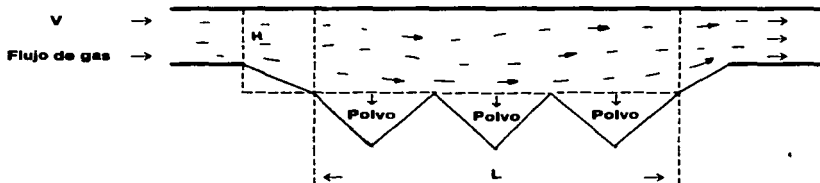


FIGURA 18 : Cámara de sedimentación.

Donde:

- $H$  = Altura efectiva de la cámara de sedimentación.
- $L$  = Longitud efectiva de la cámara de sedimentación.
- $V$  = Velocidad del gas en la entrada de la cámara.
- $L/V$  = Tiempo de permanencia de los gases en la cámara.

El gas se expande uniformemente para llenar la altura  $H$  de la cámara de gas, que tiene una longitud  $L$ . Por debajo de la cámara de sedimentación se hallan las tolvas en que cae el polvo cuando abandona la corriente gaseosa; no existe flujo en estas tolvas por lo que tras haber caído el polvo por debajo del nivel de las mismas, queda retenido efectivamente en la cámara de sedimentación.

En la figura 18 se muestra que el tiempo de permanencia del gas en la cámara de sedimentación es  $L/V$ ; en este tiempo, para una recogida completa de las partículas de polvo de cualquier tamaño determinado, el tiempo de retención en la cámara debe ser igual al tiempo que interviene una partícula de dicho tamaño para caer desde la parte superior de la cámara al nivel de la tolva, es decir  $H/V$ .

Si el tiempo de retención es menor que el valor  $H/V$ , entonces la proporción de polvo recogido está relacionada con el contenido de dicho volumen de gas correspondiente a la altura máxima, por lo cual todo el polvo habría tenido tiempo de alcanzar el nivel de la tolva.

Para fines prácticos, la cámara de sedimentación está limitada a la recogida de partículas de polvo mayores de  $100 \mu\text{m}$  o partículas de polvo con una velocidad de caída libre superior a  $1 \text{ cm} / \text{s}$ . En la industria vidriera este tipo de equipos no es utilizado, ya que para partículas más pequeñas, el tiempo de retención y el tamaño de la cámara de sedimentación llegarían a ser excesivamente grandes.

#### 4.2.2. COLECTORES POR INERCIA Y CICLONES.

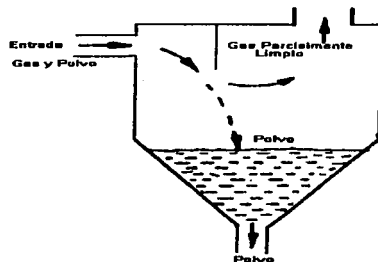
En esta categoría se agrupan muchos equipos de distintas formas; su mayor eficacia, comparada con la cámara de sedimentación, depende del hecho de que cuando se hace girar una partícula de polvo en una trayectoria circular está sujeta a una fuerza hacia fuera, incrementando la velocidad de la partícula, respecto a la del gas.

La velocidad de una partícula de  $10 \mu\text{m}$ , respecto a la del gas, habrá superado a la de una partícula de  $1000 \mu\text{m}$  que cae sólo por gravedad. La aplicación de este principio amplía la posibilidad de separar de los gases partículas inferiores a  $10 \mu\text{m}$  e incluso más pequeñas.

##### 4.2.2.1. COLECTORES [23].

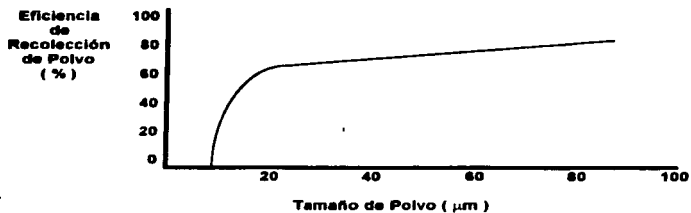
En el colector por inercia se consigue aumentar la fuerza sobre la partícula cambiando repentinamente la dirección original de flujo del gas; entonces, la partícula de polvo tiende a continuar durante corto tiempo en la dirección original del flujo del gas, y pasa a un espacio muerto donde se le permite sedimentar, con lo que se consigue mayor eficacia de separación que con la cámara de sedimentación.

El la figura 19 se muestra un colector por inercia formado por un sencillo tabique, es un desarrollo lógico de la cámara de sedimentación. Se obliga al gas a cambiar repentinamente de dirección, el polvo tiende, como consecuencia del cambio de dirección, a seguir en su dirección original hasta que el rozamiento viscoso del gas destruye su inercia. Si durante este tiempo el polvo ha alcanzado la zona estacionaria por debajo de la trayectoria de flujo, se recoge; de otro modo pasa al conducto de salida.



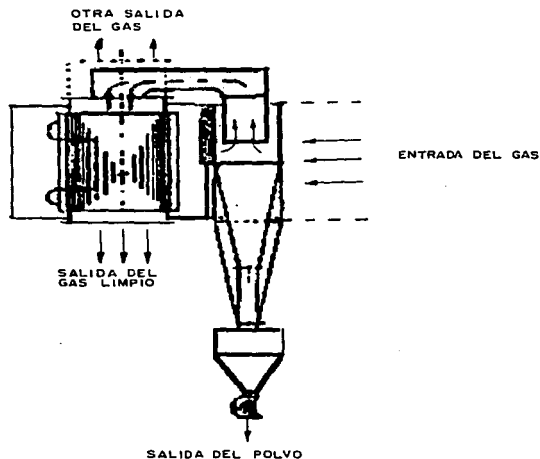
**FIGURA 19 : Separador por Inercia Sencillo.**

En la figura 20 se muestra la eficiencia de recolección de polvo ( cenizas ) de una caldera que utiliza combustible pulverizado, cuando se ensaya el aparato como un precolector para reducir la concentración de entrada de polvo a un precipitador electrostático. Con la vigente legislación sobre aire limpio mostradas en el capítulo 2 de este trabajo, estos aparatos tienen muy limitada aplicación en la industria vidriera.



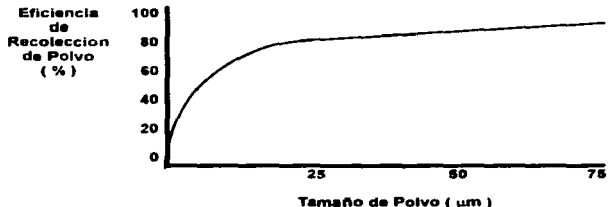
**FIGURA 20 : Tamaño de Polvo vs. Eficiencia de Recolección de Polvo.**

El colector compuesto está representado en la figura 21, utiliza el efecto de inercia y el de ciclón. Consta de un recipiente cilíndrico exterior en que se introduce tangencialmente el gas, el cual gira en dicha cámara, que concentra el polvo en la capa exterior y entonces escapa a través de las lumbreras, cerca del centro, lo que asegura que el gas cambie bruscamente de dirección provocando la posterior separación de cualquier polvo residual de los gases. El polvo permanece en la columna de giro de gas, que continúa dando vueltas en la cámara, con el resultado de que cualquier polvo que no escape a través de las lumbreras debe finalmente recogerse en el colector.



**FIGURA 21 : Colector Compuesto ( BUELL LTD. ).**

La eficiencia de este colector viene determinada por la separación de la primera etapa de limpieza por inercia más que por ciclones de alta eficiencia. De la figura 22 se deduce que es posible una eficiencia del 90 % para partículas mayores de 50  $\mu$ m.



**FIGURA 22 : Tamaño de Polvo vs. Eficiencia de Recolección de Polvo.**

También existen colectores celulares de baja pérdida de presión que tienen una eficiencia del 90 % para partículas de 25 µm y un colector de este tipo con flujo axial puede tener una eficiencia del 95 % para partículas de 10 µm., pero la pérdida de presión es considerablemente mayor que en los tipos sin flujo axial.

#### **4.2.2.2. CICLONES [23].**

El ciclón posee la mayor eficiencia de limpieza posible de los equipos separadores por inercia y es el de más bajo costo. La temperatura de trabajo sólo está limitada por los materiales de construcción como el acero, con un límite de trabajo de 590 °C o la alternativa de revestimientos de materiales refractarios que pueden trabajar a temperaturas de 850 °C, pero son más caros que el acero y la consideración del efecto de la temperatura sobre la pérdida de presión.

El ciclón consta de un recipiente cilíndrico vertical, donde se introduce el gas a través de una entrada tangencial y horizontal, el polvo se concentra por la acción del giro, en la capa del gas próxima a la pared del recipiente. La columna de giro del gas circula a lo largo del recipiente y por último cambia de dirección y sale por el conducto situado en el eje del recipiente, cayendo el polvo a la tolva colocada por debajo de la columna móvil del gas.

No es posible predecir, a partir de consideraciones puramente teóricas la relación completa entre la eficiencia y otras características de trabajo del equipo, y se han de hallar experimentalmente para cada tipo de ciclón. Por ejemplo se han establecido en forma experimental las siguientes condiciones de operación:

1. Diámetro del ciclón: la eficiencia de la recolección de polvo aumentará a medida que disminuya el diámetro del ciclón.
2. Capacidad del ciclón: La eficiencia de la recolección de polvo aumenta directamente con la velocidad del gas a la entrada, que es una medida de la capacidad del ciclón.
3. Temperatura del gas: Puesto que la viscosidad del gas aumenta cuando crece su temperatura, disminuye, por tanto, la velocidad de separación de las partículas. Esto reduce la eficiencia de separación de polvo. Sin embargo, para una masa dada de gas, el volumen aumenta con la temperatura; así se incrementa la velocidad del gas a la entrada y tiende a aumentar la eficiencia.

Se han obtenido formas mejoradas de ciclones como la que se muestra en las figuras 23a y 23b, pero aun estos no cumplen de manera satisfactoria la separación de partículas de los gases de combustión, con un diámetro menor de  $5 \mu\text{m}$  que emiten el 99 % de los hornos de la industria vidriera, como se señalo en el capítulo 2 de este trabajo. La mayor eficiencia obtenida por los ciclones para la limpieza de gases industriales es con partículas de polvo superiores a  $10 \mu\text{m}$ .

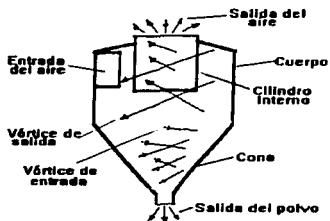


FIGURA 23a : Flujo de Gas en un Ciclón Simple.

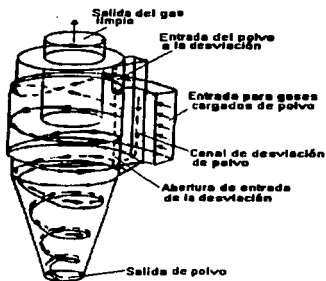


FIGURA 23b : Ciclones de Alta Eficiencia ( BUELL ).

#### **4.2.3. PRECIPITADOR ELECTROSTÁTICO [23].**

Se basa en el hecho que las partículas cargadas eléctricamente sujetas a un campo eléctrico son atraídas hacia los electrodos que crean dicho campo y depositadas sobre ellos. La separación de las partículas suspendidas del gas requiere tres etapas fundamentales

1. Introducción de una carga eléctrica sobre las partículas suspendidas.
2. Depósito de las partículas cargadas, bajo la influencia del campo eléctrico, sobre los electrodos colectores.
3. Transferencia del material recogido desde los electrodos a una tolva de almacenamiento de la que puede extraerse continuamente o a intervalos.

Se consigue cargar las partículas haciendo pasar los gases que llevan polvo a través de un sistema de electrodos, diseñado de tal modo para favorecer la producción de una descarga en corona cuando se utiliza un suministro adecuado de elevado voltaje, que suele ser unidireccional. La carga de las partículas a casi el índice máximo posible ocurre en un muy corto tiempo, menos de una décima de segundo, comparado con el tiempo de varios segundos, durante los que el gas está sometido al campo eléctrico.

Cargadas ya partículas suspendidas, pasan a través del sistema de electrodos y soportan fuerzas producidas por el campo eléctrico; por tanto, se mueven hacia los electrodos, donde quedan finalmente depositadas, de carga opuesta a la propia.., que generalmente es la de la descarga en corona.

El material depositado en los electrodos se desaloja periódicamente mediante sacudidas o vibración de los electrodos. Las fuerzas debidas a la carga eléctrica y la atracción molecular aseguran que el polvo desalojado permanezca en las masas aglomeradas con elevada velocidad de caída libre, suficiente para asegurar que alcanzan las tolvias.

Desde hace unos cincuenta años se ha aplicado industrialmente el proceso de precipitación electrostática. Durante este período se ha intentado mejorar la eficiencia real de recolección del precipitador aumentando o disminuyendo la velocidad resultante de la partícula cargada a través del gas, velocidad que se conoce como velocidad de migración. A continuación se mencionan algunos efectos de la velocidad de migración en el precipitador electrostático:

- 1.- La velocidad de migración está directamente relacionada con la fuerza del campo eléctrico. De esto se colige la importancia de trabajar al máximo voltaje del electrodo.
- 2.- La velocidad de migración disminuye a medida que aumenta la viscosidad del gas. Esto quiere decir que se obtendría mayor eficiencia de limpieza de gases si el proceso se pudiese desarrollar con el gas a temperatura relativamente baja. Esto se debe a que disminuye la viscosidad del gas cuando desciende la temperatura.
- 3.- La velocidad de migración está relacionada con un factor que depende de las propiedades eléctricas de los materiales suspendidos.

A pesar de conocer la mayoría de los efectos de la velocidad de migración en la eficiencia del precipitador no es posible deducir satisfactoriamente la eficiencia del equipo teóricamente y algunas razones de esto son:

- 1.- La dificultad en medir el tamaño de la partícula con precisión cuando no es esférica.
- 2.- La composición del gas repercute sobre el voltaje de ruptura que, a su vez, modifica la fuerza del campo eléctrico y la eficacia del precipitador.

- 3.- La resistividad eléctrica de la partícula a recolectar. Si la resistividad es muy baja, como en el caso del negro de humo, las partículas pierden inmediatamente su carga eléctrica y al adquirir la misma carga que la placa conectada a tierra son repelidas nuevamente a la corriente gaseosa.
- 4.- En la mayoría de los precipitadores comerciales el flujo no es laminar
- 5.- Los precipitadores trabajan a valores relativamente altos del número de Reynolds y el flujo es completamente turbulento. Se crea, además, una distorsión posterior por el sistema de electrodos, tanto por la distorsión física del flujo como por el efecto del viento eléctrico causado por la descarga en corona.

La dificultad de conocer el tamaño de la partícula ponen de manifiesto la imposibilidad de calcular con precisión la fuerza que actúa sobre la partícula suspendida y el tener flujo turbulento en el precipitador indica que la trayectoria de la partícula cargada no es una línea recta.

Por consiguiente, las partículas de polvo circulan con una trayectoria muy tortuosa y el depósito sobre el electrodo colector depende de si se aproxima lo suficiente a él para que las retenga. Dada la imposibilidad de calcular la eficiencia de separación del polvo a partir de consideraciones puramente teóricas, el diseñador debe confiar en la experiencia adquirida acerca de los procesos industriales y en los datos obtenidos de los precipitadores.

Pero principalmente existen dos sistemas de electrodos básicamente distintos para conseguir el proceso de carga de las partículas y de depósito; estos se conocen como diseños de dos etapas y de una etapa.

#### 4.2.3.1. DISPOSICIÓN DE LOS SISTEMAS DE ELECTRODOS DE DOS ETAPAS

En la figura 24 se muestra el esquema del diseño de dos etapas, constituido por una etapa de carga en que se utiliza la descarga en corona para cargar las partículas y a continuación de está hay una sección sin efecto corona, donde se recurre al campo eléctrico para depositar las partículas cargadas sobre los electrodos de carga opuesta, normalmente conectados a tierra.

En la práctica su aplicación está limitada a concentraciones bajas de polvo, normalmente menores de 100 mg/m<sup>3</sup>. Resulta apropiada para los sistemas de acondicionamiento de aire.

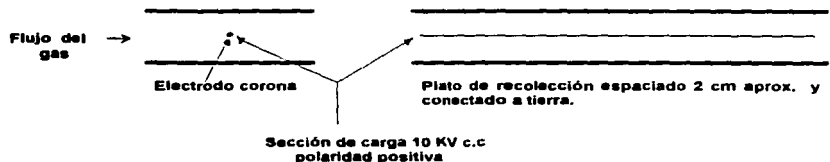


FIGURA 24 : Sistema de Electrodos de Precipitador de dos Etapas.



Los electrodos de corona suelen ser alambres finos, cuyo diámetro determina la corriente de corona. Este sistema tiene la ventaja de que la corriente, en cualquier cantidad, sólo se consume en la etapa de corona, por lo tanto es relativamente inferior al consumo de potencia.

El espacio de los electrodos para este tipo de unidad es sólo de unos 2 cm, con la consiguiente ventaja de reducir el suministro de elevada tensión necesario para un valor de 10 kV c.c. polaridad positiva. Se emplea polaridad positiva cuando el gas que ha de limpiarse es aire, que posteriormente se usará para ventilación, como corona positiva, aunque se obtienen eficiencias algo inferiores de limpieza de gas que si se hace con corona negativa y también produce mucho menos ozono.

El ozono generado es altamente tóxico, por lo cual resulta esencial que esté estrictamente controlada su formación en los sistemas de acondicionamiento de aire.

#### 4.2.3.2. DISPOSICIÓN DE LOS SISTEMAS DE LOS ELECTRODOS DE UNA ETAPA.

El segundo diseño de electrodos de precipitador de una etapa o de etapa única, es el que más comúnmente se utiliza para aplicaciones industriales a gran escala, dada su capacidad de tratar concentraciones de polvo muy altas, hasta varios centenares de mg/m<sup>3</sup>, en una amplia variedad de condiciones de trabajo.

En el esquema del diseño de una etapa los electrodos de corona también actúan como electrodos de campo y el depósito de las partículas de polvo cargadas ocurre en los electrodos conectados a tierra opuestos al sistema de electrodos de corona.

En la figura 25 se representa la forma plana del precipitador, que es el tipo más difundido en la industria en general. Este precipitador está constituido por placas verticales paralelas con electrodos de descarga, colocados verticalmente entre las placas. Las placas están más espaciadas que en el sistema de dos etapas, normalmente de 20 a 30 cm y el voltaje aplicado varía de 30 a 50 KV c.c. polaridad negativa.

En los precipitadores industriales, el espacio de los electrodos es de unos 10 a 15 cm y por ejemplo, para volúmenes superiores de gases de 30,000 m<sup>3</sup>/min., los electrodos receptores pueden tener 13 m de alto por 5 m de largo.

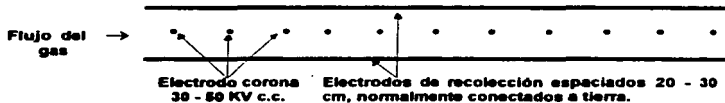


FIGURA 25 : Sistema de Electrodos de Precipitador de una Etapa.

Los gases que salen de este tipo de precipitador se descargan a la atmósfera, en relación de la toxicidad del ozono generado no tiene mucha importancia ya que el uso de la descarga en corona de polaridad negativa genera únicamente trazas de ozono.

El uso de la descarga en corona de polaridad negativa en el diseño de una etapa es aceptable por lo anterior y además este tipo de descarga en corona da un voltaje de trabajo muy superior y por lo tanto una mayor fuerza del campo eléctrico ( aproximadamente el 50 % más ) entre los electrodos que el obtenido con polaridad positiva para el diseño de dos etapas. Esto influye ventajosamente en la eficiencia de separación de polvo del precipitador.

#### 4.2.3.3. PRECIPITADORES ELECTROSTÁTICOS COMERCIALES.

Este tipo de precipitadores se destinan a la limpieza de volúmenes grandes de gas, de gases procedentes de centrales energéticas, fabricas de cemento, vidrio refinarias de metales y procesos industriales en gran escala. En la figura 26 se reproduce un dibujo de un precipitador tipo seco; es un precipitador en que el polvo se deposita en estado seco y se transfiere a las tolvas mediante sacudidas o vibración de los electrodos.

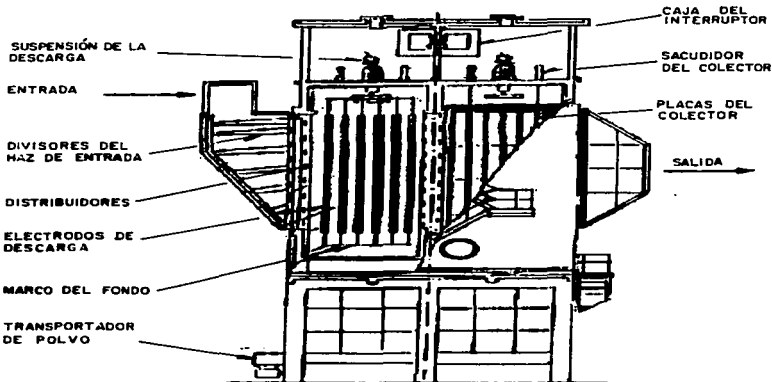


FIGURA 26 : Electrofiltro Típico de Proceso Seco.

En el extremo de entrada de la envoltura hay un sistema de distribución de gas, formado por divisores triangulares ( Divisores de haz de entrada ), que hacen girar el gas desde la vertical a la horizontal y ayudan a mantener uniforme la velocidad del gas a través de la superficie total de los electrodos.

A continuación de los distribuidores, el gas atraviesa los distribuidores de orificio, que tienen un efecto final de " alisamiento del flujo de gas ". El diseño de estos sistemas de distribución está determinado por los modelos de flujo obtenido utilizando técnicas estándares de túnel de viento para asegurar que el gas que entra en el campo eléctrico se halla dentro del 25 % del valor promedio.

En la figura se muestran los electrodos de descarga suspendidos de pilares aislantes en una habitación situada por encima de la cámara de gas. En la cámara se muestran los mecanismos limpiadores de los electrodos receptores y de corona. Los limpiadores tienen la forma de martinete y su cabeza sobresale de la cámara de gas, donde se halla el mecanismo de elevación de los martinetes.

Los limpiadores pasan a través de cierres en el suelo y ascienden mediante excéntricas a intervalos previamente ajustados para limpiar el sistema de electrodos. La frecuencia e intensidad de la sacudida del electrodo se ajusta cuidadosamente para mantener la planta en un estado razonablemente limpio sin reducir la eficacia debido al arrastre de polvo.

El precipitador electrostático tipo húmedo es otro equipo comercial, que tiene la ventaja de que trata los gases cargados de polvo en una condición saturada relativamente fría. Por tanto, la resistividad de las partículas no constituye un problema, el polvo se separa mediante el lavado del sistema de electrodos con agua.

El precipitador húmedo, aunque es muy eficaz con los polvos más finos y con materiales difíciles, está sujeto a problemas de corrosión, debido a la presencia de mezclas de gases ácidos corrosivos como el óxido de azufre, nitrógeno y cloruro de hidrógeno, que al contacto con el agua forman ácidos.

Para este tipo de precipitador se necesita además una torre de enfriamiento para enfriar el agua y una planta de tratamiento de agua para reducir la cantidad de sólidos en suspensión, que pueden bloquear los tubos y pulverizadores. Los precipitadores húmedos sólo se utilizan para ciertas aplicaciones especializadas en las cuales está justificado el costo extra del tratamiento del agua.

En resumen, algunas de las características por lo cual los precipitadores electrostáticos son el sistema de filtración de mayor demanda en la industria son:

- 1.- Permite separar de los gases partículas de hasta  $0.01 \mu\text{m}$  de diámetro.
- 2.- Se puede trabajar en un amplio margen de temperatura si se eligen adecuadamente los materiales al diseñarlo. Usualmente se utiliza a un máximo de  $450^\circ\text{C}$  para construirlo de acero y económicamente sea rentable su construcción.
- 3.- Es posible separar cualquier tipo de material suspendido mediante un precipitador. Si el polvo se encuentra en forma seca que fluye libremente, se utiliza el precipitador seco y cuando es líquido en forma de niebla, tal vez el precipitador húmedo solucione satisfactoriamente este problema.
- 4.- Puede obtener cualquier eficiencia requerida

#### **4.2.4. FILTRACIÓN [23].**

Es el método más antiguo utilizado para separar materiales suspendidos en gases, se basa en el principio de hacer pasar los gases cargados de polvo a través de un medio filtrante donde queda atrapado el polvo.

Cabe agrupar ampliamente los medios filtrantes en tres tipos:

1. Lechos de grava o arena con o sin limpieza incorporada.
2. Papel poroso y esteras fibrosas, normalmente " filtros fijos ".
3. Filtros de tela y de fieltro, normalmente con limpieza incorporada.

Los lechos de partículas agregadas están formados por partículas de tamaño uniforme, de materiales minerales tales como arena o grava, su eficiencia aumenta cuando disminuye el tamaño de las partículas agregadas. Una aplicación reciente emplea lechos de arena fina de 2 metros de profundidad para filtrar partículas finas de materiales radiactivos procedentes de gases residuales con una eficiencia superior al 99 % incluso para partículas submicroscópicas.

El polvo desalojado del filtro cae en tolvas situadas debajo del lecho. El filtro de partículas agregadas tiene la ventaja de su sencillez y facilidad de trabajo a temperaturas elevadas y el contenido de humedad de los gases es bajo como en la limpieza de los gases procedentes de los hornos en la industria del cemento.

Los filtros de papel tienen propiedades mecánicas relativamente pobres, se recurre a este tipo de filtro en aplicaciones a temperaturas menores donde las concentraciones de polvo sean inferiores a 5 mg/m<sup>3</sup>, su empleo en el control industrial de la contaminación es poco aceptable.

El filtro de materiales fibrosos está formado por fibras tanto naturales ( algodón, lana, etc. ) como sintéticas ( nylon ) o vidrio. En todos los materiales filtrantes, las condiciones de trabajo están determinadas por las propiedades mecánicas de los materiales a la temperatura de trabajo y por las consecuencias del ataque químico por elementos corrosivos en el gas y polvo, que pueden conducir a la rápida deterioración de los filtros. En la tabla 42 se muestran diversos tejidos utilizados como medio filtrante.

**TABLA 42**  
**PROPIEDADES DE DIVERSOS TEJIDOS UTILIZADOS**  
**PARA LA FABRICACIÓN DE FILTROS**

MATERIAL	TEMPERATURA MÁXIMA DE TRABAJO (°C)	RESISTENCIA ÁCIDOS                      ALCALIS	
ALGODÓN	90	Baja	Alta
LANA	90	Alta	Moderada
NYLON	110	Baja	Alta
ORLÓN	120	Alta	Moderada
TERYLENE	130	Alta	Alta
NOMEX	200	Moderada	Alta
TEFLON	230	Alta	Alta
FIBRA DE VIDRIO	270	Moderada	Moderada
ACERO INOXIDABLE	+ 400		

Se están investigando nuevos materiales que cabe esperar amplíen considerablemente el intervalo de temperaturas. En la figura 27 se muestran los resultados de los ensayos, actualmente estos nuevos materiales son caros, y sólo pueden justificarse económicamente para aplicaciones especiales.

RESISTENCIA  
( % )

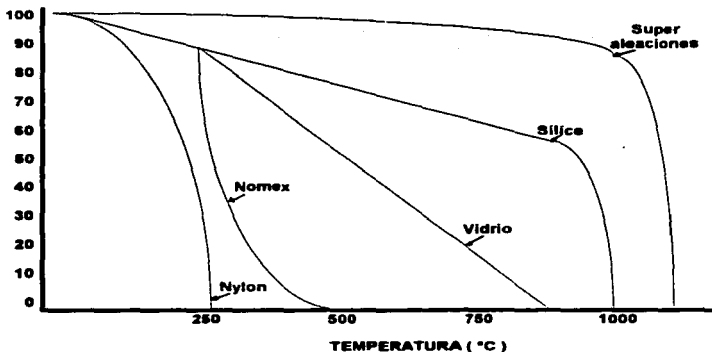


FIGURA 27 : Variación de la Resistencia de las Fibras con la Temperatura

#### 4.2.5. LAVADORES Y ABSORBEDORES HÚMEDOS [23].

Son aparatos que utilizan fases mezcladas de gas y líquido. El objetivo del aparato de lavado o absorbedor consiste en transferir la materia suspendida en el gas al líquido absorbedor, fácilmente separable del aparato de limpieza de gases, y entonces el gas sale limpio hacia el proceso para el cual ha de utilizarse' o se descarga a la atmósfera.

La transferencia de materia o polvo suspendida en el gas al líquido se basa en la colisión entre las partículas de polvo y las gotas de líquido en suspensión en el gas, la colisión y coalescencia resultante se provoca mediante cuatro causas principalmente:

- 1.- **Efectos de la inercia y efectos de la gravedad:**  
La probabilidad de colisión entre gotas de líquido absorbentes y partículas suspendidas en el gas crece a medida que las velocidades de estos dos también aumentan relativamente entre sí.
- 2.- **Efecto electrostático:**  
Las partículas de polvo se cargan electrostáticamente, y esto desencadena la atracción entre la gota de líquido y la partícula.

**3.- Tensión de difusión:**

Están sujetas a movimientos browniano, esto significa que las partículas muy pequeñas están sometidas a un movimiento al azar, que aumenta la probabilidad de colisión con las gotas de líquido de gran diámetro, libres de este efecto.

**4.- Efecto térmico:**

Los gases se hallan inicialmente a una temperatura relativamente alta; una consecuencia de la absorción es enfriar el gas, saturarlo y enfriarlo por debajo de la temperatura de saturación, este efecto ocasiona que las partículas de polvo se comporten como núcleos de condensación, en los cuales el vapor condensante se deposita selectivamente, y así aumenta la masa.

El efecto de inercia y de gravedad predomina para las partículas de polvo más gruesas y el movimiento browniano influye más intensamente en las partículas de humo más finas y el factor de condensación probablemente afecta a las partículas de todos los tamaños.

Se ha trabajado mucho y durante años para establecer el rendimiento de los diversos tipos de absorbedores, concluyendo que la eficiencia de separación de polvo en el absorbedor guarda poca relación con el diseño y geometría de los absorbedores, siempre que se suministre un líquido adecuado para la absorción en la zona de contacto del absorbedor.

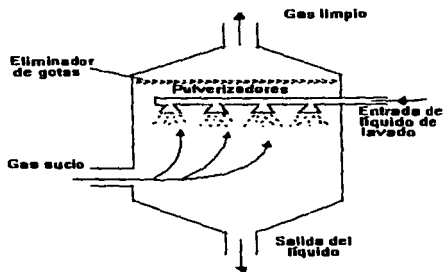
Esto significa que la habilidad del diseñador se ha de centrar en las características prácticas concernientes a dar un lavado continuo con un gasto en sustitución y mantenimiento mínimo. Los aparatos de lavado de gases más comunes son:

- 1.- Torre de pulverización por gravedad.
- 2.- Absorbedor de pulverización autoinducida.
- 3.- Absorbedores de choque.
- 4.- Absorbedores de alta energía.

**4.2.5.1. TORRE DE PULVERIZACIÓN POR GRAVEDAD.**

Consiste en un gran recipiente a través del cual suele fluir el gas por el plano vertical, a relativamente baja velocidad. En la figura 28 se muestra una disposición típica en la cual se introduce el líquido mediante un sistema de pulverizadores cerca del techo de la torre, por encima de estos hay un sencillo eliminador de gotas, del tipo por inercia, para evitar el arrastre de gotas de agua en la chimenea.

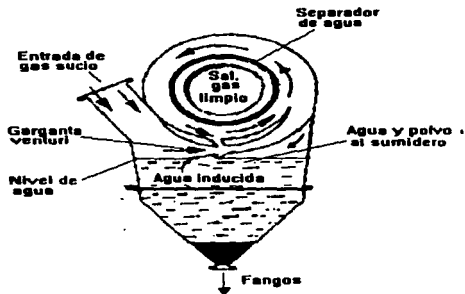
Este aparato sólo es realmente aconsejable para la separación de partículas de polvo de diámetro superior a 10  $\mu\text{m}$ . La eficiencia de lavado dependerá de mantener elevada la velocidad relativa entre las gotas de agua y polvo para aumentar la probabilidad de colisión y coalescencia. Una ventaja importante de este tipo de absorbedor de gas es su bajísimo consumo de energía.



**FIGURA 28 : Torre de Pulverización**

#### **4.2.5.2. ABSORBEDORES DE PULVERIZACIÓN AUTOINDUCIDA.**

Aprovecha la velocidad y energía del gas para inducir la pulverización a fin de realizar la absorción. En la figura 29 se representa un clásico absorbedor de este tipo.



**FIGURA 29 : Colector de Pulverización Autoinducida.**

El gas sucio entra al absorbedor a través de un Venturi en forma de garganta conectado por una ranura estrecha al agua contenida en el sumidero por debajo del absorbedor. Con ello se trata de inducir un flujo de agua, desde la ranura, en el gas, donde se atomiza y arrastra alrededor de la cámara circular del absorbedor, que actúa a la vez como una región de contacto entre las gotas y el gas con polvo y como un separador ciclónico.

El gas limpio pasa a través de un separador de agua, del tipo por inercia, hacia el centro de la cámara, cuyas aletas obligan al gas a cambiar de dirección unos 180° con lo cual se asegura que el gas limpio, que abandona el absorbedor a lo largo del eje, no arrastra nada de agua. Con este tipo de absorbedor, vuelve a circular la misma agua, y hay una sedimentación natural para separar las partículas de polvo en el agua.

El lodo se deposita en la base de la cámara. Este tipo de absorbedor está limitado a partículas mayores que 1  $\mu\text{m}$ , si se requiere una eficiencia superior al 90 %.

#### 4.2.6.3. ABSORBEDORES DE CHOQUE

En este diseño, el gas sucio entra por la base de la torre y circula hacia arriba a través de una cortina descendente de agua, que separa el polvo grueso de una manera similar a como lo hace la torre por gravedad. En la figura 30 se muestra un absorbedor de lecho fluidificado.

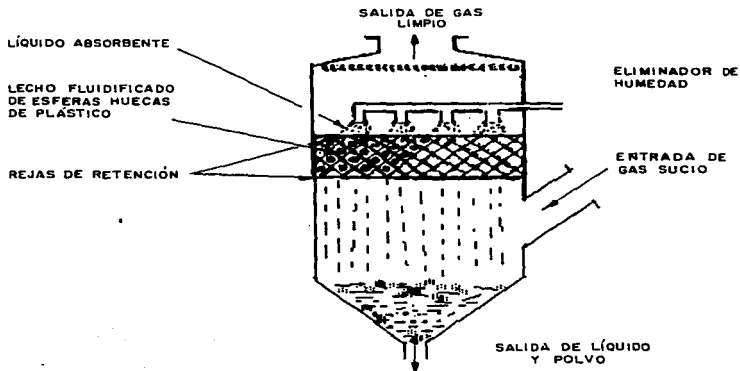


FIGURA 30 : Absorbedor de Lecho Fluidificado.



Casi en el centro de la torre, entre dos rejillas de retención, hay un lecho de esferas huecas de plástico, de baja densidad que, como consecuencia de la columna ascendente del gas, se mantienen en un estado de movimiento fluido. Se pulveriza el líquido absorbente sobre la rejilla de retención superior, de modo que las esferas siempre están mojadas por una pulverización descendente del líquido.

El efecto neto de los cambios de dirección tortuosa del gas, es que las partículas de polvo se separan del gas y chocan contra las esteras mojadas. Debido al movimiento de las esferas, el sistema se autolimpia continuamente.

El lecho fluidificado puede ser también de tabiques estacionarios de madera, moldes plásticos como anillos Raschi. Los absorbedores de choque con una pérdida de presión de 15 cm de agua, tendrían una eficiencia mayor del 90 % para partículas inferiores a 1  $\mu\text{m}$ . En la figura 31 se muestran curvas típicas de eficiencia-tamaño de partícula para varios tipos de absorbedores.

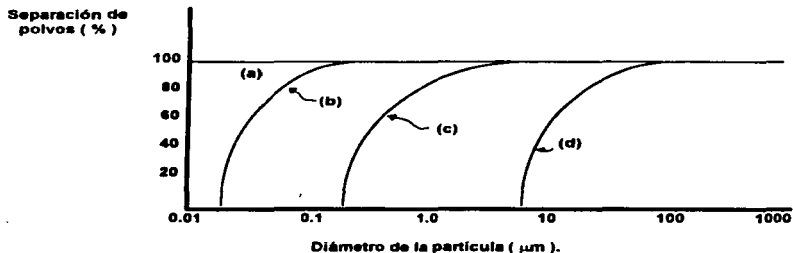


FIGURA 31 : Eficiencia del Absorbedor-Tamaño de la Partícula.

- a).- Absorbedor de alta energía, pérdida de presión 150 cm de agua.
- b).- Absorbedor de energía media-alta, pérdida de presión 40 cm de agua.
- c).- Absorbedor de impacto, pérdida de presión 15 cm de agua.
- d).- Torre de pulverización, pérdida de presión 5 cm de agua.

#### 4.2.5.4. ABSORBEDOR DE ALTA ENERGÍA

El absorbedor más conocido de este tipo es el Venturi, cuyo diagrama se muestra en la figura 32. El gas que entra en el Venturi se acelera en la garganta donde el agua pasa a través de pulverizadores atomizadores; a continuación el agua suspendida y el gas atraviesan un eliminador de agua, en este caso mostrado en forma de separador tipo ciclón.

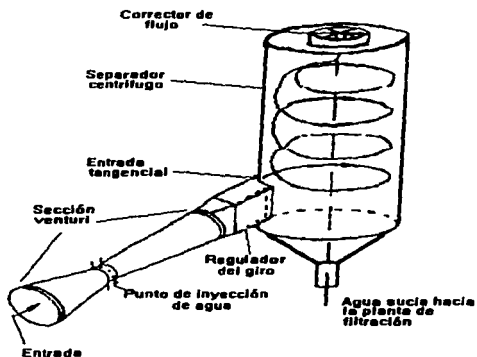


FIGURA 32 : Absorbedor Venturi de Alta Energía.

La eficiencia del conjunto absorbedor depende de la capacidad del eliminador de humedad tipo ciclón para separar prácticamente toda la humedad suspendida. En los absorbedores de alta energía, este problema aumenta a medida que decrece el tamaño de la gota, debido a la elevada turbulencia del gas.

La pérdida de presión y la velocidad en la garganta del Venturi, estará determinada por el tamaño de la partícula y la eficiencia de separación requerida. En la tabla 43 se muestra la relación entre la velocidad en la garganta, y la eficiencia de separación para partículas de 1  $\mu\text{m}$ .

**TABLA 43**

**EFICIENCIA DE SEPARACIÓN ESPERADA PARA PARTICULAS DE POLVO DE 1  $\mu\text{m}$  PARA ABSORBEDOR VENTURI DE ALTA ENERGÍA.**

VELOCIDAD DEL GAS ( m/s )	DIAMETRO DE LA GOTA INDUCIDA ( $\mu\text{m}$ )	EFICIENCIA DE SEPARACIÓN ( % )
15	320	42
30	160	75
60	80	95
90	55	99
120	40	99

Según la tabla 43 las necesidades de energía aumentan cuando disminuye el tamaño de las partículas y con la eficiencia de separación requerida. El efecto se representa en la figura 30, curvas (a) y (b) en donde la curva (a) muestra un absorbedor de alta energía, con una pérdida de presión de más de 140 cm de agua, manteniendo una eficiencia del 99 % para partículas de 0.002  $\mu\text{m}$  de diámetro. Es evidente que siempre que se disponga de la suficiente energía, el absorbedor de alta energía es capaz de aproximarse a una eficiencia del 100 % para partículas inferiores a 0.01  $\mu\text{m}$ ..

**4.2.5.5. ASPECTOS PRÁCTICOS DE LA APLICACIÓN DEL ABSORBEDOR.**

La eficiencia del absorbedor viene determinada por la energía total que consume, ya sea en forma de energía para atomizar el agua o en pérdida de presión a través del absorbedor, y debe considerarse la mejor manera de introducir el agua, ya que esta es un bien caro, cuyo costo ha aumentado para la industria con el creciente rigor de la legislación sobre control de la contaminación.

En la práctica, el agua pasa del absorbedor aun sistema de enfriamiento y filtración para volver a circular de nuevo al absorbedor. En los absorbedores de alta energía se requiere una buena filtración ya que las partículas sólidas que proceden del gas o del agua provocan una rápida erosión de la garganta del absorbedor.

Se utilizan diferentes materiales de construcción, desde aceros aleados hasta carburo de silicio, material refractario cuya dureza se aproxima a la de diamante. El carburo de silicio y materiales refractarios son caros y sólo se utilizan en todo el cuerpo del absorbedor o en la garganta de máxima turbulencia cuando es indispensable, obteniendo una vida útil de muchos años, incluso en condiciones arduas.

El agua requerida para un absorbedor depende de las condiciones de trabajo, en particular de la temperatura del gas entrante. Es importante no permitir que el gas atraviese el absorbedor con poca agua o sin ella ya que ésta proporciona el medio de contacto para el polvo, también desempeña el papel secundario de lubricar la garganta del absorbedor y reducir la erosión. Resumiendo las características importantes se tiene:

- 1.- No existe límite en la temperatura, pero las temperaturas altas aumentan el consumo de agua. Esto conduce a la formación de penachos de vapor de agua, capaces de originar problemas secundarios de contaminación.
- 2.- El costo del absorbedor es moderado o alto dependiendo del material que se utilice para su construcción y además el costo de la planta de tratamiento de agua puede ser hacer que el costo total invertido sea alto.
- 3.- Con la misma pérdida de presión, la eficiencia del absorbedor aumenta con la cantidad de agua.
- 4.- La concentración de polvo en el gas que sale del absorbedor varía poco en comparación con las grandes oscilaciones de la concentración de entrada.
- 5.- Los absorbedores variables ( Absorbedor de disco de inundación, Absorbedor de orificio variable y Absorbedor de abertura anular )pueden mantener la misma pérdida de presión y , por tanto, el lavado del gas para variaciones de volumen en la proporción de 5:1.

#### **4.2.6. AGLOMERACIÓN SONICA Y ULTRASÓNICA**

En estos últimos años se han intentado diseñar sistemas de lavado de gases destinados específicamente a promover la formación de aglomerados, por medio de ondas de relativa baja frecuencia, en los intervalos sónicos y ultrasónicos. El equipo consta de un generador de energía sónica o ultrasónica, de una cámara donde se produce la aglomeración, seguida por un ciclón o colector para separar el material acumulado. En el grupo sónico y ultrasónico, los aglomeradores pueden clasificarse como:

- 1.- **Oscilador de alta frecuencia:** Se utiliza un transductor de bobina móvil similar a un altavoz en un conjunto de radio y un circuito impulsor apropiado que produzca considerables cantidades de energía a cualquier frecuencia deseada.
- 2.- **Sirena de alta frecuencia:** Que trabaja según un principio similar a las sirenas utilizadas para propósitos de alarma, constituida alternadamente por tambores perforados estacionarios y rotatorios.
- 3.- **El chorro Hartland:** utiliza vibraciones dirigidas produciendo un chorro de aire a velocidades muy altas hacia un objetivo especialmente diseñado, localizado en el punto focal de un reflector parabólico.

Mediante varios dispositivos de estos generadores, se ha logrado un éxito notorio con la aglomeración de niebla de ácido sulfúrico y líquidos similares en el campo de los aerosoles. Pero en la aplicación de gases de combustión, según parece, el diseño presenta mayores dificultades comparado con los tipos más usuales de sistema de lavado de gases.

El consumo de energía es apreciable y se ha presentado mucha atención al efecto de ambas oscilaciones, la audible y la ultrasónica, sobre el sistema nervioso de los seres humanos. No parece que los sistemas de lavado de gases basados en este método tengan demasiado porvenir.

#### 4.2.6. EQUIPOS PARA CONTROL DE EMISIONES EN LA INDUSTRIA DE VIDRIO.

Brian Heap gerente general de UK Glass Industry [24] establece que con la tecnología de la actualidad se pueden reducir las emisiones de SOx, HCl, HF y partículas hasta los límites rigurosos establecidos por "TA Luft", con la siguiente serie de figuras se muestran las reducciones de contaminantes al utilizar diferentes equipos de control de emisiones, al utilizar combustóleo como combustible. La figura 33 esquematiza el problema promedio de la industria del vidrio y clasifica a las emisiones contaminantes en dos, la primera en partículas sólidas que requieren ser removidas por un medio físico y la segunda una fase gaseosa, que requiere una neutralización para su reducción.

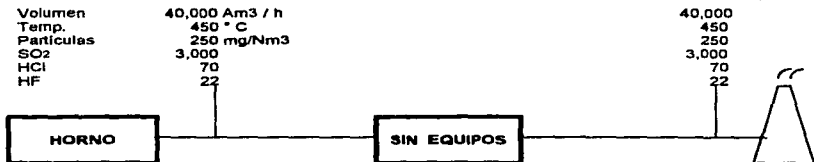


FIGURA 33 : Proceso sin Equipo de Control de Emisiones Contaminantes.

En la figura 34 se muestra la inclusión de un precipitador electrostático (ESP) en el proceso. El cual reduce los niveles de partículas en un 80%.

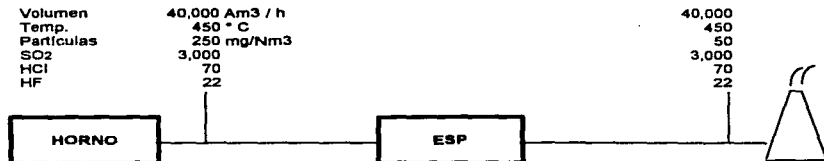
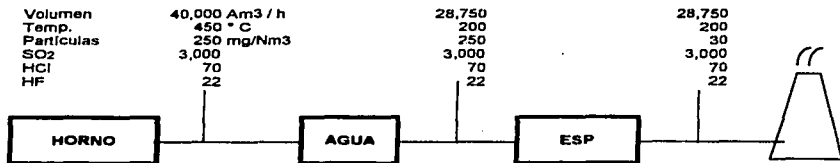


FIGURA 34 : Proceso con un Precipitador Electrostático.

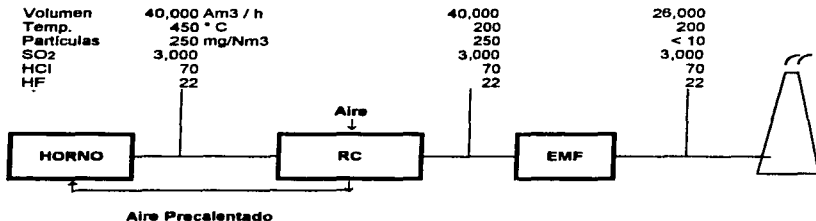
La eficiencia del ESP puede mejorar enfriando las emisiones antes de hacerlas pasar por el ESP. El método más utilizado es enfriar los gases con agua, con este sistema se incrementa la humidificación de las partículas mejorando la eficiencia de recolección del ESP. En la figura 35 se observa el planteamiento anterior donde el ESP obtiene una eficiencia del 88 % de recolección con una disminución de la temperatura de las emisiones a 200 °C.



**FIGURA 35 : Proceso con Enfriamiento y Precipitador Electrostático.**

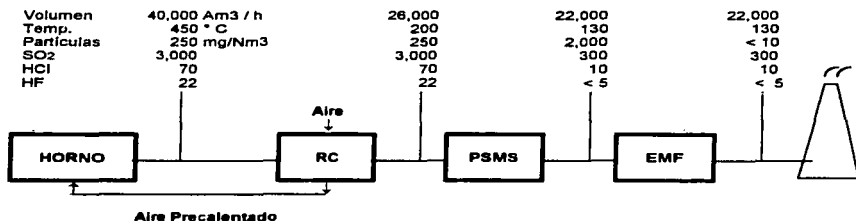
La desventaja de este sistema es el costo del consumo de 1500 kg/h de agua para enfriar las emisiones y la gran cantidad de vapor que se emite a la atmósfera por la chimenea.

UK Glass Industry sustituyó el anterior sistema por el de la figura 36, donde el ESP es sustituido por un equipo con modernos filtros, que ofrecen una alta eficiencia y seguridad junto con un fácil mantenimiento. Estos filtros requieren que las emisiones tengan una temperatura similar a la que se usa en un ESP ( 200 a 250°C ). El método para enfriar estos gases es por medio de un recuperador de calor ( RC ) , el cual utiliza aire frío, que posteriormente se reutiliza como aire precalentado en los quemadores, lo que implica un ahorro de energía. Se observa en la figura 36 como el equipo de filtración ( EMF ) tiene una eficiencia mucho mayor que con el ESP.



**FIGURA 36 : Proceso con Inclusión de Recuperador de Calor( RC ) y Equipo de Filtración ( EMF ).**

Como se observa en la figura 36 las emisiones contaminantes tienen gases por lo cual hay que instalar un equipo en el proceso que neutralice estos gases ácidos como se observa en la figura 37. Existen procesos en seco, semiseco, semihúmedo y húmedo. En UK Glass Industry se utiliza el proceso semiseco ( PSMS ) donde se emplea el hidróxido de calcio como reactivo.



**FIGURA 37 : Proceso con Recuperador de Calor, Equipo de Filtración y la inclusión de un Sistema para Neutralizar Gases.**

Un sistema de control de emisiones como el mostrado en la figura 37, fue instalado por Manville Co. En un horno para fundir vidrio borosilicato en Wanterville E.U.A., donde utilizan gas natural como combustible. En la tabla 44 se muestran los resultados obtenidos con la instalación de los equipos para reducir las emisiones contaminantes.

**TABLA 44**

**NIVELES DE EMISIÓN OBTENIDOS AL INSTALAR SISTEMAS DE CONTROL DE CONTAMINANTES EN UNA PLANTA DE VIDRIO.**

NIVELES DE EMISIÓN		INICIAL		FINAL	
		MAX.	MIN.	MAX.	MIN.
FLUJO	(Nm <sup>3</sup> /h)	21,456	17,745		
TEMPERATURA	(°C)	870	870		
FLÚOR	(Nm <sup>3</sup> /h)	466	384	46.6	38.4
SO <sub>2</sub>	(Nm <sup>3</sup> /h)	1,970	1,589	197.0	159.0
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	(Nm <sup>3</sup> /h)	974	794		
PARTÍCULAS	(mg/Nm <sup>3</sup> )	422	341	64.0	51.0
OPACIDAD	(%)			< 10	< 10

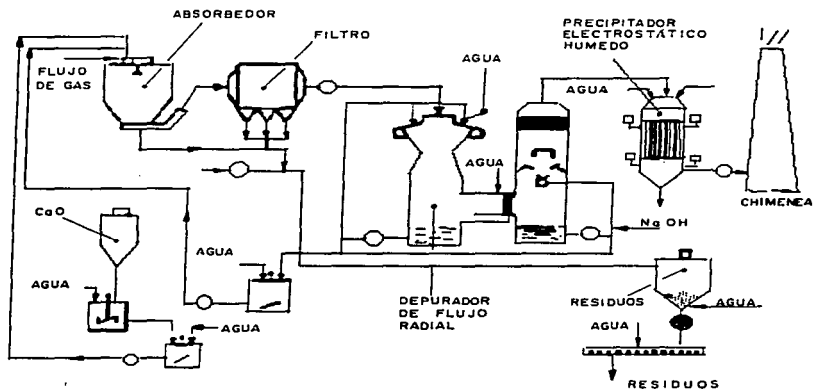
Las condiciones estándar (N) son a 15.55 °C y 29.92 pulgadas de Mercurio.

Como se observa en la tabla 44 la inclusión de la tecnología mostrada en la figura 37, excede las expectativas de reducción de emisiones contaminantes al producir vidrio del tipo borosilicato. Esta industria vidriera actualmente trabaja sin ningún problema legal por cuestiones ecológicas.

La planta de vidrio de Lurgi GmbH [25] en Frankfurt Alemania por 37 años ha investigado y diseñado equipos para controlar o eliminar las emisiones contaminantes generadas por sus hornos. Lurgi GmbH muestra tres diferentes procesos, cada uno de distintas características, condiciones de operación, eficiencia y costos.

En la figura 38 se muestra el proceso en húmedo que se basa en lavar los gases contaminantes con un agente neutralizante que consiste en una solución de hidróxido de calcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) y soda ash ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) o sosa cáustica ( $\text{NaOH}$ ) en agua a temperatura debajo del punto de rocío.

En este proceso se obtiene una gran eficiencia en la reducción de contaminantes, pero se adicionan grandes cantidades de agua para reducir la temperatura de los gases que salen del horno lo cual implica una gran desventaja por el alto costo del consumo de agua en países Europeos como Alemania, además el costo de tener que instalar torres de enfriamiento y una planta de tratamiento para poder usar el agua, hacen que el proceso en húmedo no sea muy usado en la industria del vidrio, el más empleado es el proceso semiseco y el proceso en seco.

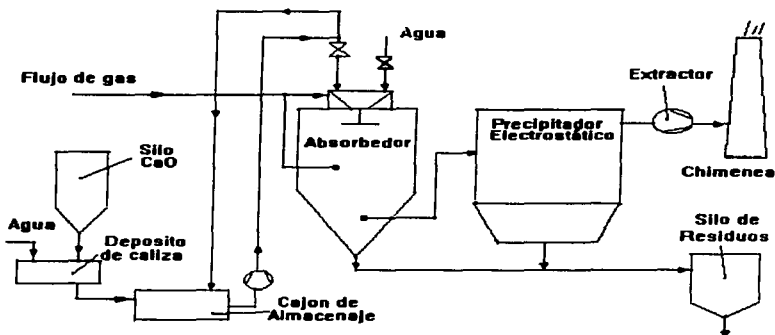


**FIGURA 38 : Sistema de Lavado de Gases por el Proceso en Húmedo.**

En el proceso semiseco que se muestra en la figura 39 un agente neutralizante (Caliza) es disuelto en agua para obtener una solución la cual es rociada con el atomizador dentro de la torre de absorción. Las finas gotitas que se forman del neutralizante reaccionan sobre los gases contaminantes a una temperatura de 150 a 170 °C.

Las gotas al entrar en contacto con los gases calientes se evaporan y los productos de reacción son separados por gravedad, los gases contaminantes remanentes del flujo de gases alimentados son separados por un precipitador electrostático o un equipo de filtración.



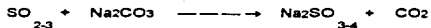


**FIGURA 39 : Sistema de Lavado de Gases por el Proceso Semiseco.**

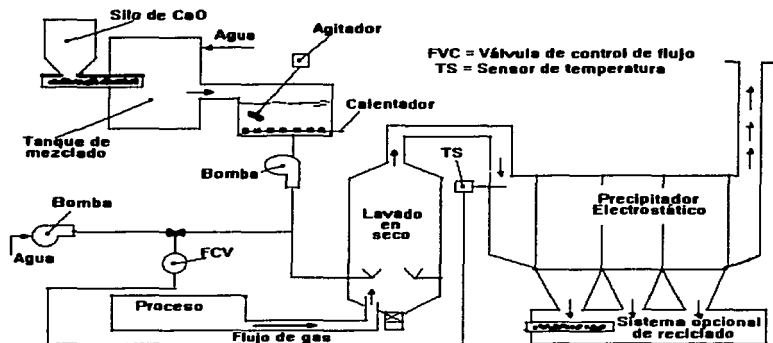
Gerresheir Glas [26] con ayuda de United McGill Corp, en Alemania en uno de sus hornos tipo regenerativo que produce vidrio plano y utiliza combustóleo como combustible, tenía problemas serios de emisiones de SO<sub>x</sub>. La fuente de este tipo de emisiones se debía por el contenido de azufre en la carga que se introduce al horno y por el tipo de combustible utilizado.

Para reducir las emisiones de SO<sub>x</sub> instaló en su horno el proceso semiseco en combinación con un precipitador electrostático (ESP). Usando como agente neutralizante soda ash (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) para reducir sus emisiones contaminantes. El álcali seleccionado fue la soda ash por que es una materia prima que se utiliza en la formulación del vidrio y se tienen yacimientos disponibles.

Lo que se busca en general en este sistema es que las emisiones de gases de SO<sub>x</sub> se conviertan a partículas y luego removidas con un ESP. Gerresheir Glas señala que con la soda ash se lleva a cabo la siguiente reacción química:



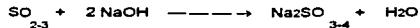
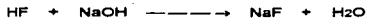
Las emisiones de SO<sub>x</sub> salen a una temperatura promedio de 500 °C. Gerresheir Glas indica que la reacción álcali/SO<sub>x</sub> ocurre más rápidamente a temperatura menores, por lo cual el gas es enfriado a una temperatura promedio de 170 °C, con el equipo de lavado en seco antes de que el gas entre al ESP. En la figura 40 se ilustra el concepto básico del sistema lavado en seco / ESP.



**FIGURA 40 : Sistema de Lavado en Seco y Precipitador Electrostático.**

United McGill Corp en tres de sus hornos recuperativos que producen vidrio tipo borosilicato al sureste de E.U.A., donde se tenían problemas de emisiones de SO<sub>x</sub>, HF y gases de boro, se empleó sosa cáustica como reactivo para neutralizar los gases ácidos de HF y reducir el boro para evitar obtener porcentajes altos de opacidad causados por la condensación de boro.

Las reacciones son complejas por lo que en las siguientes reacciones típicas se trata de describir el efecto del HF y boro con la sosa cáustica:



La temperatura de los gases a la salida de la chimenea del horno son de 900 °C, los gases son enfriados a 400 °C, utilizando el mismo sistema mostrado en la figura 40.

United McGill menciona que la instalación de los anteriores equipos y otros más de similares características han dado buenos resultados; las emisiones de gases se han reducido satisfactoriamente y el álcali utilizado en el proceso de reducción de contaminantes se recupera y en la mayoría de los casos se utiliza como materia prima en la formulación de vidrio. El reciclado del álcali utilizado reduce los costos al reducir o eliminar las emisiones de gases ácidos.

Gerresheir Glas [25] en base a estudios de ingeniería ordenó construir una planta para el lavado de los gases de emisiones con el proceso en seco, como el de la figura 41 para otro de sus hornos, ya que encontró que el proceso en seco tiene mayores ventajas económicas que el proceso semiseco.

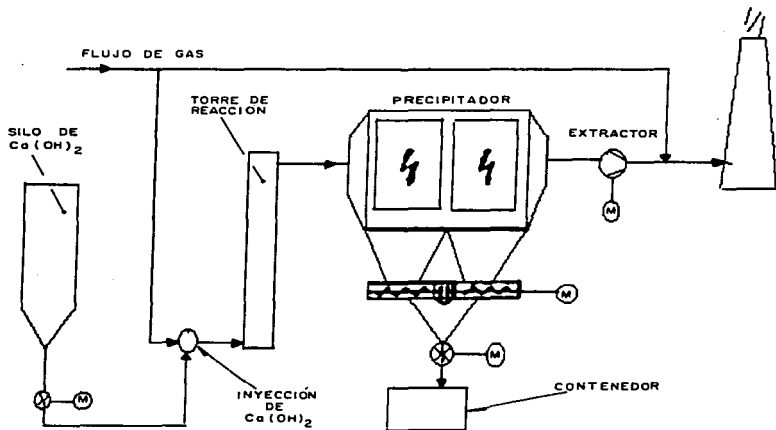


FIGURA 41 : Sistema de Lavado de Gases por el Proceso en Seco.

En el proceso en seco los gases contaminantes son reducidos por la adición de un reactivo sólido deshidratado. Dependiendo del diseño del sistema, la temperatura de trabajo está entre 150 a 450 °C. En la mayoría de los casos el reactivo utilizado es la Caliza, la cual es inyectada dentro del flujo de gas para formar sales de calcio con los contaminantes gaseosos.

Para facilitar las reacciones de adsorción en la superficie, el agente químico debe ser un polvo muy fino que pase malla 200 (apertura 0,075 mm). El consumo de Caliza depende de la cantidad requerida por la reacción química, puede ser reducido el consumo usando material con altos valores de superficie específica, como de 40 m<sup>2</sup>/g.

Los productos de reacción expulsados por los ductos de la chimenea pasan al precipitador electrostático o equipo de filtración del sistema. El proceso en seco es eficiente en la reducción de NOx y los costos de operación resultan bajos, los productos remanentes generados en el proceso de lavado de gases contaminantes de gases son sólidos que pueden ser reutilizados en el sistema.

Algunas instalaciones en plantas productoras de vidrio usan procesos de adsorción en seco para la reducción de SOx cuando se utiliza combustóleo como combustible pero experiencias en plantas de vidrio japonesas reportan severos problemas de corrosión causados en el sistema de lavado de gases por la formación de piro sulfatos.

En algunas plantas de vidrio se utiliza arsénico y selenio como ingredientes menores en la fabricación de vidrio, el problema es que parte de estas materias primas volatilizan en partículas extremadamente finas que son arrastradas por el " Carryover" en el flujo de gases contaminantes, representando un problema serio para el medio ambiente ya que con el precipitador electrostático y equipos de filtración no se obtiene una eficiencia de retenido aceptable para estas sustancias por su pequeño tamaño de partícula.

Afortunadamente en las legislaciones ambientales de países Europeos y E.U.A. se prohíbe el uso de arsénico en la fabricación de vidrio, lo que ha conscientizado a la industria vidriera en general el restringir el uso de dicho material.

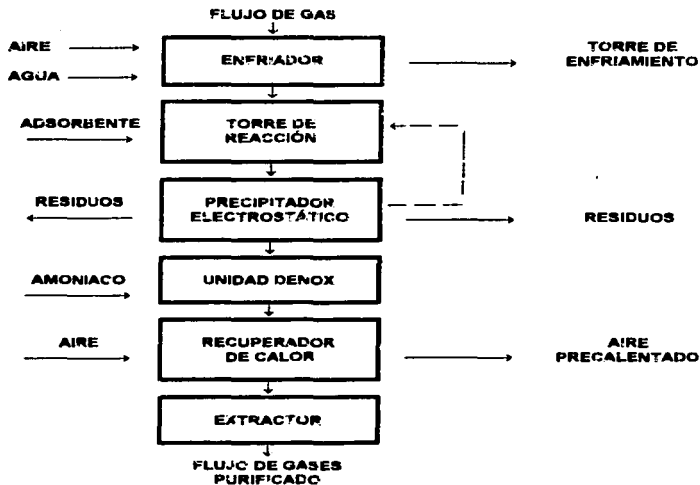
El selenio es un material importante en la fabricación de vidrio cristalino y se ha visto reducida su volatilización al mezclarlo con algún ingrediente mayor de la formulación antes de introducirlo al horno para la fabricación de vidrio, permitiendo que las partículas que se arrastren en el flujo de gas sean en porcentajes menores y de un tamaño que permita que el precipitador electrostático trabaje eficientemente.

Oberland Glas AG. [25] construyó la primera planta para reducir las emisiones de NOx usando una solución de 25 % de amoníaco en agua a una temperatura de trabajo de 350 °C. El amoníaco reduce los NOx a nitrógeno y vapor de agua con una relación de conversión superior al 80 %.

El diagrama de la figura 42 representa la unidad completa de control de emisiones contaminantes. Al entrar el flujo de gas en la primera unidad se establecen los requerimientos y adaptación de temperatura del proceso que debe ser como máximo 400°C si se utiliza un precipitador electrostático en la unidad de control de emisiones y de 120 a 170 °C si se emplea un equipo de filtración.

En la segunda unidad del proceso se encuentra la torre de reacción, donde se lleva a cabo la interacción de las emisiones gaseosas con el agente adsorbente ( Caliza ). La selección y utilización de este agente fue decidida ya que los residuos pueden ser reciclados como una materia prima para la elaboración del vidrio.

En la tercer unidad se recomienda tener una salida de residuos o polvos por cada precipitador electrostático o bien dependiendo de la relación de flujo de gases a tratar se puede diseñar un sistema que cuente con los ductos que satisfagan las necesidades requeridas para desalojar los residuos y el material que deba ser reciclado nuevamente a la torre de reacción. Los residuos pueden ser reciclados directamente al horno de fusión de vidrio o almacenados para su utilización como materia prima del proceso.



**FIGURA 42 : Unidad de Control de Emisiones Contaminantes.**

La unidad DENOX es la que se encarga de reducir la concentración de NOx de los gases, los cuales deben salir del precipitador con una baja carga de polvos a una temperatura de 300 a 400 °C como máximo para que la unidad DENOX obtenga eficiencia del 80 % como mínimo en la reducción de los NOx.

La instalación de un recuperador de calor es recomendable si es económicamente viable o si se necesita utilizar más aire precalentado en el sistema de quemadores del horno de fundición de vidrio o de alguno de los hornos de templado del vidrio. La instalación de un extractor para expulsar los gases lavados es conveniente para compensar la caída de presión del sistema.

El capital necesario para la instalación y funcionamiento de la unidad de control de emisiones contaminantes es de tres millones de francos alemanes aproximadamente, este costo incluye costo de operación y depreciación.

Teller Environmental Systems, Inc. publicó en The Glass Industry [27] cinco sistemas (Horno eléctrico, sistema venturi, precipitador electrostático, sistema de nucleación y separación, cromatográfica) empleados por la industria de vidrio en E.U.A. para el control de emisiones, estos sistemas se encuentran funcionando para distintos tipos de hornos que producen vidrio para fabricar envases, vidrio plano, fibra de vidrio, etc.

El sistema venturi es una modificación del convencional arreglo de torre empacada-venturi-ciclón, para recuperación de partículas y neutralización de gases ácidos. En la figura 43 se representa el sistema venturi que incluye precipitación o evaporación del sulfato de sodio capturado o formado con el fin de evitar la descarga de agua contaminada con el reactivo al drenaje municipal. Si esto no se evitara el sistema instalado en un horno de 140 ton/día de vidrio descargaría al drenaje aproximadamente 400,00 libras por año de sulfato de sodio, lo cual resulta económicamente y ambientalmente negativo.

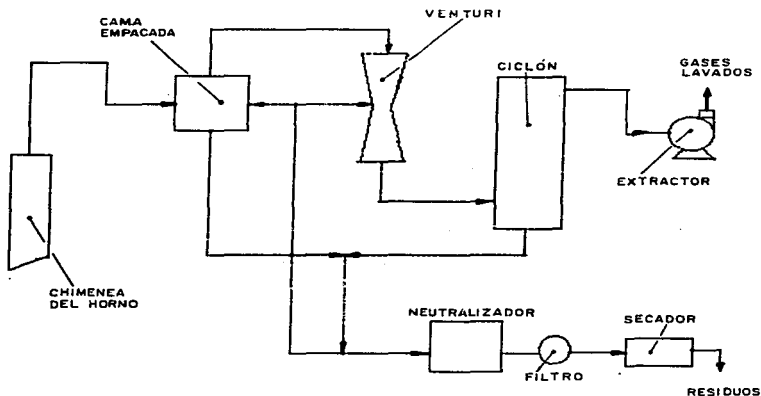


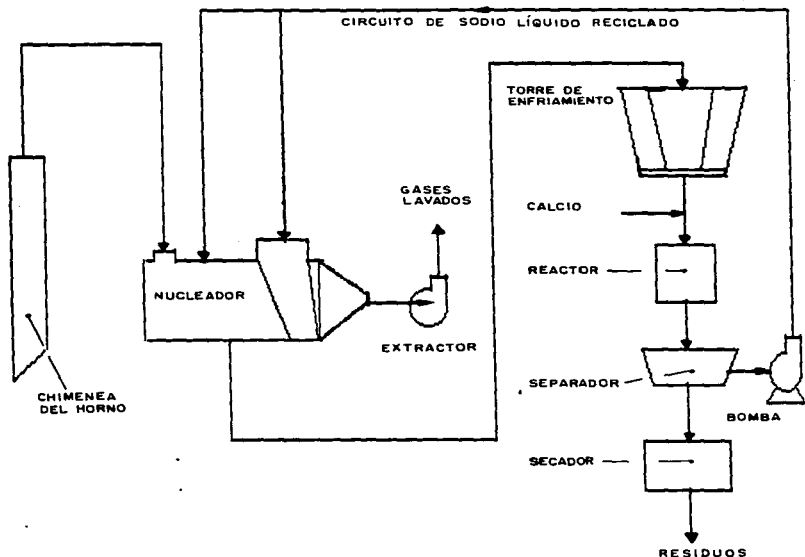
FIGURA 43 : Sistema Venturi.

El precipitador electrostático remueve las partículas sólidas pero no remueve las pequeñas partículas gaseosas ácidas. Apesar de esto la eficiencia de este sistema es buena y permite obtener valores de opacidad menores a 10 % y niveles de emisión de partículas como máximo de 0.02 g/scf\* en un horno que produce vidrio cristalino para envases donde los niveles de opacidad sin control de emisiones llega hasta 50 % y 0.3 g/scf de emisión de partículas.

\*scf: pies cúbicos a condiciones estándar (273 °K y 1013 mbar).

El lavado de gases por el sistema de nucleación es capaz de remover, de los gases contaminantes, partículas del tamaño de micras a baja energía. El sistema indicado en la figura 44 expulsa los gases para después de hacerlos pasar por una torre de enfriamiento para posteriormente hacer pasar los gases por el sistema de lavado como se muestra en la figura 44.

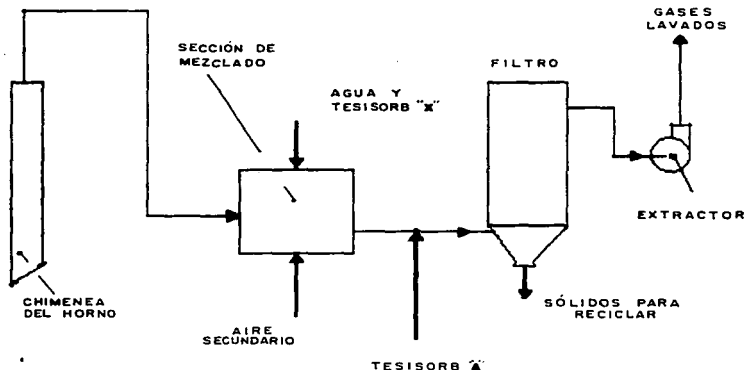
En este tipo de sistema se encuentra en operación en hornos que producen fibra de vidrio y vidrio tipo ópalo obteniendo niveles de emisiones menores de 1 ppm de gases de HF, 0.02 g/scf de partículas y 5 % de opacidad.



**FIGURA 44 : Lavado de Gases por el Sistema de Nucleación**

El sistema por separación cromatográfica mostrado en la figura 45 puede disminuir los valores de opacidad hasta 0 %, la descarga total de partículas pueden llegar a niveles de 0.005 g/scf. En el sistema se observa cómo los gases contaminantes son introducidos a una sección de mezclado donde se introduce aire y la mezcla de agua con el Tesisorb X que sirve para remover pequeñas cantidades de SO<sub>2</sub>, posteriormente en la línea del sistema es adicionado el Tesisorb A para capturar y remover las partículas de SO<sub>3</sub>.

Ya que las partículas más pequeñas son aglomeradas por los reactivos cromatográficos, los sólidos generados pasan a un equipo de filtración, donde la bolsa de filtrado es sacudida en intervalos de 24 a 72 horas, lo cual permite que la vida útil del filtro se extienda considerablemente, además de que el utilizar los agentes cromatográficos ayuda a que no haya ataque químico de los sólidos generados con el filtro.



**FIGURA 45 : Lavado de Gases por el Sistema de Limpieza en Seco**

Un filtro utilizado en un sistema para la producción de vidrio ámbar duró 13 meses en operación y otro en la producción de fibra de vidrio duró 15 meses. En el caso de horno para producir fibra de vidrio, donde los gases de B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y HF son emisiones típicas, este sistema es preferible ya que simultáneamente neutraliza estos gases ácidos, los cuales en un sistema con un proceso húmedo causarían severos problemas de precipitados y taponamiento del sistema.



**TABLA 46**  
**CONTROL DE EMISIONES EN UN HORNO DE 20 A 40 TON/DÍA**  
**PARA LA PRODUCCIÓN DE FIBRA DE VIDRIO**

MEDICIÓN	ALIMENTACIÓN DE GASES CONTAMINANTES	GASES A LA SALIDA DEL SISTEMA	
		Húmedo - Nucleación	Seco - Tesisorb
Partículas ( g/scf )	0.2 - 0.4	0.006	0.005
Opacidad ( % )	30 - 80	0 - 10	0
Gases de flúor ( ppm )	80 - 150	0.4	< 1
S0x ( ppm )	150	0.4	< 30
Partículas de boro (g/scf)	0.02	< 0.0005	< 0.002
Relación Costo - Prod.		1.6	1

Como se mostró, existen varias alternativas para el control de emisiones contaminantes en la industria del vidrio, la eficiencia del venturi, nucleador, precipitador electrostático y el horno eléctrico se han comprobado prácticamente en la industria de vidrio en donde se demostró que el venturi, nucleador y el sistema por cromatografía son eficientes para remover óxidos de de azufre, cumpliendo los requerimientos ecológicos más estrictos.

Además el precipitador electrostático, el horno eléctrico y el sistema por cromatografía son relativamente más fáciles de operar y dar mantenimiento por el personal que labora en planta. El venturi y el nucleador requieren de personal calificado para su operación y mantenimiento lo cual incrementa los gastos de operación. El sistema que presenta menor costo de operación y de inversión inicial es el sistema por cromatografía.

Pero el sistema seco es el más recomendable para usarse en hornos que utilicen combustibles con alto contenido de azufre, ya que se obtienen una considerable reducción en las concentraciones de S0x.

En la tabla 46 se muestran los resultados de eficiencia de recuperación y costos de reactivos para el control de S0x en un horno que produce 150 toneladas por día de envases de vidrio, utilizando distintos porcentajes de contenido de azufre en el combustible.

**TABLA 46**

**RESULTADOS DE EMISIONES DE SO<sub>x</sub> EN UN HORNO DE FUSIÓN DE VIDRIO  
CON SISTEMA TESISORB A Y TESISORB X.**

COMBUSTIBLE	RECUPERACIÓN DE SO <sub>x</sub> lb/h		TESISORB UTILIZADO lb/h		COSTOS Dils. \$/Año.
	SO <sub>3</sub>	SO <sub>2</sub>	X	A	
<b>300 ppm SO<sub>2</sub> a la salida</b>					
Gas natural	5.0	13	6	17	4,010
Combustóleo (0.5 % S)	5.4	24	9	17	4,435
Combustóleo (1.5 % S)	6.2	52	22	17	5,955
<b>60 ppm SO<sub>2</sub> a la salida</b>					
Gas natural	5.0	43	9	17	4,010
Combustóleo (0.5 % S)	5.4	82	40	17	7,930
Combustóleo (1.5 % S)	6.2	167	108	17	15,700

En la tabla 47 se muestra como resumen el comportamiento de cinco alternativas para el control de emisiones, en esta tabla se indica eficiencia del equipo anticontaminante y los costos aproximados de inversión y operación.

La elección de utilizar estos tipos de equipos o de otro tipo no solo está regido por los costos de operación, mantenimiento, etc. Sino, por las exigencias en los límites de emisiones de cada país e inclusive de cada ciudad.

Para la tabla 47 se señalan las siguientes notas:

- (1) Servicios :                      Combustible 1.05 Dils. / 1x10<sup>6</sup> BTU  
   Eléctricidad 0.02 Dils./ kwh  
   Vapor 0.60 Dils./ 1000 lb
- (2) Amortización:                    10 años
- (3) Porcentaje de gasto  
 en mantenimiento:                Precipitador electrostático 5%  
   Sistema empleado en cromatografía 3%  
   Sistema húmedo 6%

(4) Químicos:	NaOH	100 Dils./Ton
	Ca(OH) <sub>2</sub>	25 Dils./Ton
	TESISORB A	50 Dils./Ton
	TESISORB X	28 Dils./Ton
(5) Mano de obra:	15,000 Dils./año	
(6) Reuso de sólidos:	5 Dils./Ton	
(7) Valor recuperado:	20 Dils./Ton	

Para la reducción de emisiones de NOx al utilizar gas natural en la industria del vidrio, recientemente se ha optado por instalar sistemas de combustión oxí-gas como se mostrará con mayor detalle en el capítulo de medio ecológico.

**COMPARACIÓN DE COSTOS DE SISTEMAS DE CONTROL DE EMISIONES CONTAMNANTES  
EN UN HORNO QUE PRODUCE 160 TONELADAS DE VIDRIO**

		PRECIPITADOR ELECTROSTÁTICO	CROMATOGRFO	CROMATOGRFO X	VENTURI	NUCLEADOR	HORNO ELÉCTRICO
<b>OPERACIÓN</b>	Opacidad	< 10	0	0	< 10	< 10	< 20
	Paticulas g/scf	0.015 - 0.020	0.003 - 0.006	0.003 - 0.006	0.015 - 0.025	0.015 - 0.025	0.015 - 0.025
	% SOx Removido	0	25	80 - 95	90-98	95-99	0
<b>CAPITAL</b>	Costo de instalación de equipo (dlls.)	7000,00	400,000	4000,000	550,000	550,000	No se reporta
<b>CARACTERISTICAS</b>	Sólidos generados( lb/hr)	26	132	131	84	82	0
	HP instalados	25	60	60	250	160	0
	Consumo de Electricidad ( Kwh/Ton )	0.3	0	0	0	0	950
	Vapor generado ( lb/Ton )	0	0	0	0	160	0
<b>COSTOS ( DLLS/ TON )</b>	Servicios (1)	0.20	0.14	0.14	0.57	0.43	8.50
	Amortización (2)	1.30	0.74	0.74	1.02	1.02	No se reporta
	Mantenimiento (3)	0.51	0.26	0.26	0.56	0.62	No se reporta
	Productos químicos (4)	0.0	0.06	0.14	0.23	0.11	0.0
	Servicio técnico (5)	0.07	0.14	0.14	0.28	0.28	0.0
	Reuso de sólidos (6)	0.01	0.05	0.05	0.03	0.03	0.0
	<b>TOTAL:</b>						
	Costosto por combustible	2.09	1.39	1.47	2.69	2.49	8.5 + (2)+ (3)
	Costo de químicos recuperados.	0.04	0.06	0.15	0.15	0.15	
	<b>COSTO NETO :</b>	2.05	1.33	1.32	2.54	2.34	8.5 + (2) + (3)



**HORNO ECOLÓGICO EN LA  
INDUSTRIA DEL VIDRIO**

## CAPITULO V

### HORNO ECOLÓGICO EN LA INDUSTRIA DEL VIDRIO

La sustitución del método de fundición de vidrio del horno regenerativo por el sistema oxí-gas, obedece principalmente a la problemática de la contaminación ambiental ya que producen bajas emisiones de NOx y partículas.

Con excelentes resultados, este tipo de horno ecológico, tanto en lo que se refiere a su capacidad de producción como en la reducción de las emisiones de elementos contaminantes al medio ambiente, garantiza que plantas de vidrio instaladas en grandes ciudades con las más estrictas legislaciones de tipo ambiental puedan seguir operando sin ningún riesgo.

Verrerie Cristallerie d'Arques de Francia [28] con asistencia francesa para el control ambiental y energía ( ADEME ) convirtieron un horno de 50 Ton/día con sistema de combustión aire-gas a cien porciento oxí-gas en febrero de 1991, obteniendo una reducción del 97 % en emisiones de NOx y 15 % en ahorro de combustible.

Coming Glass de E.U.A. [29] ha convertido 45 hornos a oxí-gas, uno de ellos fue para Gallo Glass en uno de sus hornos que fabrica botellas para vino en California. Corning Glass considera los hornos con sistema oxí-gas como una segunda revolución tecnológica en la industria del vidrio, la primera se considera cuando se empezaron a utilizar regeneradores de calor en los hornos de fusión de vidrio.

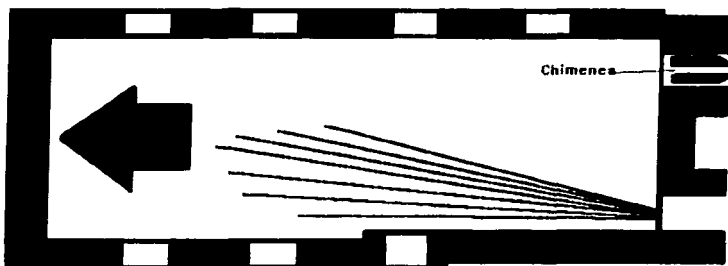
El oxígeno fue usado por muchos años como ayuda o suplemento para la combustión en la fusión del vidrio, pero en la década de los noventas se investiga detalladamente el efecto en la transferencia de calor con oxígeno puro al sustituirlo en un horno que utiliza aire para la combustión. Como se ha indicado, la formación de NOx está sujeta a las altas temperaturas que se manejan en el horno y el nitrógeno del gas. Verrerie Cristallerie d'Arques ( VCA ) muestra los resultados de un estudio en la tabla 48 donde se observa la reducción de emisiones del 97 % NOx utilizando oxígeno puro.

TABLA 48  
FACTOR DE REDUCCIÓN CALCULADA CON COMBUSTIÓN  
DE O<sub>2</sub>/ GAS NATURAL ( 41% N<sub>2</sub> ) [28].

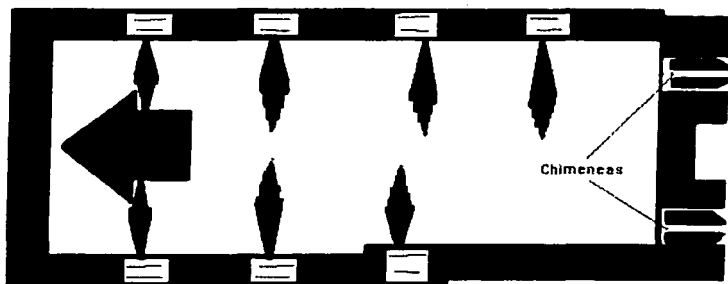
OXIDANTE	TEMPERATURA °C	RELACION (NOx) AIRE / (NOx) OXÍGENO PURO
AIRE	600	18
AIRE	1100	38
OXÍGENO	25	1

La modificación del horno con puertos traseros de VCA en febrero de 1991 se muestra en la figura 48. Esta modificación contempla regular los quemadores en tres zonas, con el objetivo de obtener el perfil de temperaturas necesarios para una adecuada fusión de materias primas en el fundidor del horno, ya que al utilizar 100 % de oxígeno en el horno se producen altas velocidades de flama, aumenta la temperatura y ancho de flama, por lo cual el dividir en tres zonas el horno permite un mejor control de las temperaturas.

**HORNO TIPO PUERTOS TRASEROS QUE UTILIZA AIRE PRECALENTADO PARA LA COMBUSTIÓN**



**HORNO TIPO UNIT MELTER QUE UTILIZA EL SISTEMA OXI-GAS**



**FIGURA 46 : Conversión de Horno con Puertos Traseros a un Horno Tipo Unit Melter con Quemadores Laterales Utilizando el Sistema Oxi-Gas.**

El número de quemadores necesarios cuando se hace la conversión al sistema oxi-gas que se recomienda es de 5 a 12 dependiendo del tamaño de horno. Se establece que para obtener una mayor eficiencia del horno se especifica una área de fundición de 3.8 Ton/m<sup>2</sup> por día para producir vidrio cristallino y ámbar con la utilización de 20 % de pedacería de vidrio foráneo.

En la figura 47 se muestra el sistema de control de las tres zonas de quemadores, el control es por un sistema automático "Flamoxal" y válvulas MFV. Este sistema controla la relación de flujo de 2 % de oxígeno por 1 % de gas, la precisión de este equipo es esencial para evitar el impacto de las flamas y obtener buenos resultados.

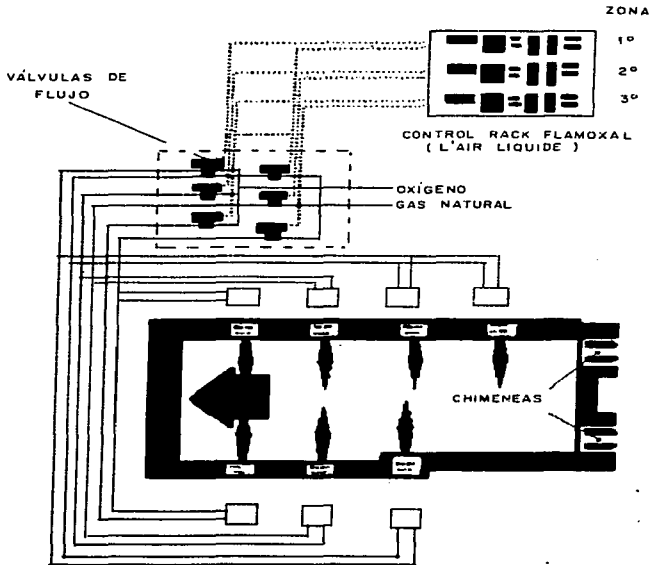


FIGURA 47: Sistema de Control para Quemadores Flamoxal en un Horno Oxi-Gas.



VCA muestra en la tabla 49 las emisiones de NOx utilizando aire en la combustión y con la conversión al sistema oxí-gas, al tener el 100 % de oxígeno se obtiene una reducción del 95.7 % en las emisiones de NOx con respecto a la que produce el horno cuando se trabaja en el sistema de combustión con aire, usando gas con un contenido del 11.6 % de nitrógeno.

**TABLA 49**  
**EMISIONES DE NOx AL UTILIZAR CON EL GAS NATURAL**  
**OXÍGENO O AIRE EN LA COMBUSTIÓN.**

EMISION	AIRE ( promedio )*	OXÍGENO ( promedio)*	OXÍGENO (Optimo )**
<b>Producción de NOx:</b>			
g NO <sub>2</sub> / h	13130	660	170
g NO <sub>2</sub> / Ton vidrio	7500	320	87
<b>Concentración de NOx en mg NO<sub>2</sub>/Nm<sup>3</sup> ( humo):</b>			
Con 3 % Oxígeno	3547	1008	324
Con 8 % Oxígeno:	2551	725	233

\* Con Gas natural con un contenido del 11.6 % de N<sub>2</sub>.

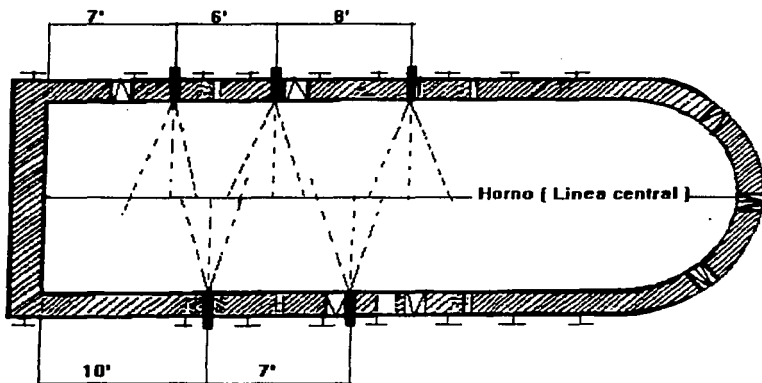
\*\* Con Gas natural con un contenido del 0.4 % de N<sub>2</sub>.

En la combustión con oxígeno la formación de NOx depende directamente de la concentración de nitrógeno en el gas y la concentración del oxígeno como se observa en la tabla 49. Comparando los valores de emisiones de NO<sub>2</sub> al utilizar oxígeno o aire para la combustión con gas natural con un contenido de 11.6 % de nitrógeno, se logra con oxígeno una reducción hasta 20 veces al valor obtenido con el aire.

Además se observa que se podría reducir todavía más las emisiones utilizando oxígeno y gas con 0.4 % N<sub>2</sub> las emisiones de NOx. Se reduce todavía 4 veces al valor obtenido al utilizar oxígeno y gas con 11.6 % N<sub>2</sub>. Aunque esta reducción de NO<sub>2</sub> es significativa, económicamente por el costo del oxígeno más el del combustible con baja concentración de nitrógeno, es poco común ponerlo en la práctica en los hornos de la industria vidriera.

Coming [30] señala que los hornos de vidrio regenerativos, al convertirse a 100 % oxí-gas, quedan como hornos tipo Unit Melter, donde los quemadores se colocan desfasados ( " Off Set " ) como se muestra en la figura 48, con el objetivo de evitar la remezcla de las flamas, las cuales, debido al impacto de las flamas entre sí harían que las corrientes resultantes " barriesen " por convección uniformemente la bóveda, la cual a su vez, radiaría el calor hacia el vidrio. En este caso se reduciría la vida de la bóveda; se tendría escurrimiento de sílica y por consiguiente se incrementaría de forma crítica el porcentaje de piedra refractaria en los productos fabricados ( envases, vidrio plano, etc. ).

Además de no dañar la bóveda del horno Coming señala que al colocar los quemadores " Off Set " se obtiene reducir las emisiones de NOx por evitar el mezclado intenso de flamas y hay un mejor control y reducción de las temperaturas de flama. Esta reducción de temperatura no afecta para nada la eficiencia de fundición de la carga.



**FIGURA 48 : Posición " Off Set " de Quemadores en un Horno Tipo Unit Melder con Sistema Oxi-Gas.**

Praxair y Union Carbide Industrial Gases [31] dan la siguiente ecuación general donde se ilustra el balance de energía de un horno de fundición, se considera que existen pérdidas de calor a través de las paredes del horno aunque se encuentra aislado la temperatura del flujo de gas es igual con la combustión de aire o con oxígeno.

$$a.F_1 + b.F_2 = c.P + d \quad (\text{Kcal/h})$$

Donde:

**F1:** Combustible quemado con aire ( Nm<sup>3</sup> gas/h ).

**F2:** Combustible quemado con oxígeno puro ( Nm<sup>3</sup> gas/h ).

**P :** Producción neta ( kg de vidrio / h ).

Las letras **a**, **b**, **c** y **d** son constantes, los valores típicos para estas constantes en hornos con recuperadores o regeneradores de calor son mostradas en la tabla 50.

**TABLA 50**

**CONSTANTES PARA HORNOS CON RECUPERADORES  
Y REGENERADORES DE CALOR**

CONSTANTE	RECUPERADOR	REGENERADOR
a	1.00	1.00
b	1.25	1.15
c	0.15	0.15
d	200.00	50 - 500

La ecuación expresa que se tiene aire puro en la combustión cuando  $F_2 = 0$  y puro oxígeno en la combustión cuando  $F_1 = 0$ , los valores de  $F_1$  y  $F_2$  representan también casos intermedios donde se tiene en el sistema de combustión ayuda con oxígeno o aire.

Los resultados más positivos se obtienen cuando se utiliza 100 % de oxígeno para la combustión como lo demuestra Carr Glass Company [31] en Baltimore E.U.A. al convertir dos hornos de 75 Ton/día aproximadamente cada uno para producir envases perfumeros de vidrio cristalino con asistencia del departamento de energía de E.U.A. y Praxair al sistema oxi-gas. La tabla 51 muestra los resultados de conversión a hornos oxi-gas por Carr Glass Company.

Al usar oxígeno en la combustión de sus hornos Carr Glass obtuvo un incremento en la producción, una reducción del 90 % en emisiones de  $\text{NO}_x$  y se redujo el consumo de energía hasta un 18 %.

La conversión a oxi-gas se realizó en 6 semanas, en este período se instaló en los hornos un analizador de gases para monitorear la concentración de  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{NO}_x$  y  $\text{O}_2$  con el fin de ajustar prácticamente la relación de oxígeno-gas a la requerida en el proceso, obteniendo los resultados de la tabla 51.

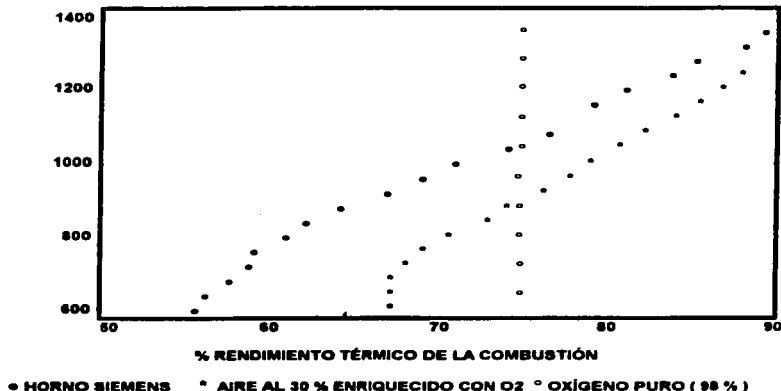
En la lista de "Coming Glass" [33] de hornos convertidos al sistema oxi-gas al 100 % se incluye de todos tipos: recuperativo, regenerativo, fundición directa y todo eléctrico. El vidrio producido en estos hornos es de diferentes composiciones como la de sódico-cálcico, borosilicato, ópalo, aluminio-silicato, etc. Los productos obtenidos con estos tipos de vidrio pueden ser envases, fibra de vidrio, vidrio plano, cristal de plomo, vidrio para TV, tubo de vidrio, material para laboratorio, etc.

Para comprobar la eficiencia térmica del sistema oxi-gas en la figura 49 se muestra la eficiencia térmica ( Calor Útil / Calor Disponible ) vs temperatura de precalentamiento de un horno regenerativo SIEMENS. En los tres casos indicados en la figura 49 los gases exhaustos desalojan la cámara de combustión a 1500 °C.

**TABLA 51**  
**RESULTADOS DE CONVERSIÓN A HORNO OXI-GAS**  
**POR CARR-LOWREY GLASS COMPANY**

DESCRIPCIÓN	CASO CON BASE AIRE	CASO CON BASE OXÍGENO	
		HORNO 1	HORNO 2
<b>CONDICIONES:</b>			
Producción ( Ton /día )	62.7	46.8	75.8
Temperatura óptica ( °C )	1469.0	1467.0	1519.0
Consumo de energía calculado ( 1,000,0000 Kcal/h ).	3.42	2.24	3.45
Flujo de gas ( Nm3/h )	5663.0	1500.0	869.0
<b>ANÁLISIS DEL FLUJO DE GASES ( % ) :</b>			
N <sub>2</sub>	72.0	38.0	30.0
H <sub>2</sub>	14.0	36.0	43.0
CO <sub>2</sub>	9.0	22.0	26.0
O <sub>2</sub>	5.0	4.0	1.0
<b>EMISIONES DE NO<sub>x</sub>:</b>			
NO <sub>x</sub> ( kg/h )	25.6	2.6	2.9
( kg/Ton vidrio )	10.8	1.45	1.05
<b>NO<sub>x</sub> DE NITRÓGENO ( 100 % CONVERSIÓN ) :</b>			
NO <sub>x</sub> (kg/h )	3.1	2.3	2.9
( kg/Ton vidrio )	1.3	1.3	1.3

**TEMP. PRECALENTAMIENTO  
DE AIRE DE COMBUSTIÓN ( °C )**



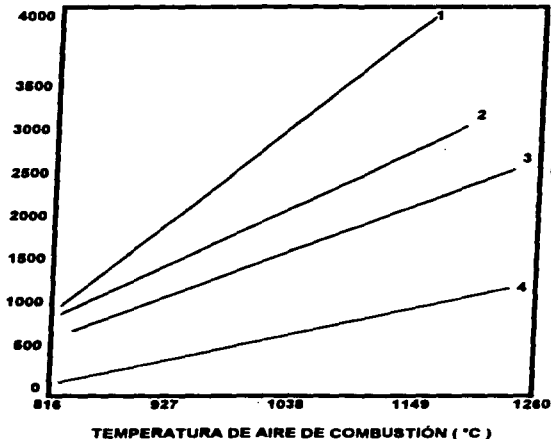
**FIGURA 49 : Temperatura de los Gases Efluentes Dejando la Cámara del Fundidor a 1500 °C ( Se Utiliza Gas Natural ) [30].**

Como se puede apreciar la eficiencia del sistema oxí-gas es fija y únicamente depende de la temperatura a la cual se desalojan los gases quemados y en cambio en un horno regenerativo, la eficiencia se incrementa conforme aumenta la temperatura de precalentamiento del aire.

Por ejemplo: a una temperatura de precalentamiento del aire de 1070 °C, se observa que en este punto el horno SIEMENS tiene casi la misma eficiencia térmica que un horno oxí-gas ( 74.20 % ) y a temperaturas mayores de precalentamiento del aire de combustión, el horno regenerativo resulta con más eficiencia que un horno oxí-gas, pero se tiene el inconveniente que a altas temperaturas de precalentamiento del aire, se genera una cantidad importante de NO<sub>x</sub> como se muestra en la figura 50. Es necesario aclarar que un horno oxí-gas desaloja a menor temperatura sus gases exhaustos ( menos de 1500 °C ) por lo que su eficiencia térmica será un poco mayor.

En la figura 50 se muestran cuatro curvas ( 1, 2, 3 y 4 ), cada una se obtuvo con diferentes relaciones estequiométricas ( 1.49, 1.19, 1.08 y 0.95 ) de oxígeno / nitrógeno, en algunos casos se utilizó diferentes porcentajes de exceso de aire. Se observa en la curva 4 sin exceso de aire y aunque se tengan temperaturas de aire de combustión altas, las emisiones de NO<sub>x</sub> son más bajas que en las otras tres curvas.

**NOx ( ppm )  
CORREGIDO A  
0 % O<sub>2</sub>**



**ESTEQUIOMETRICO:**

**Curva 1 = 1.49  
( 11% EXCESO DE AIRE )**

**Curva 2 = 1.19  
( 11% EXCESO DE AIRE )**

**Curva 3 = 1.08  
( 8% EXCESO DE AIRE )**

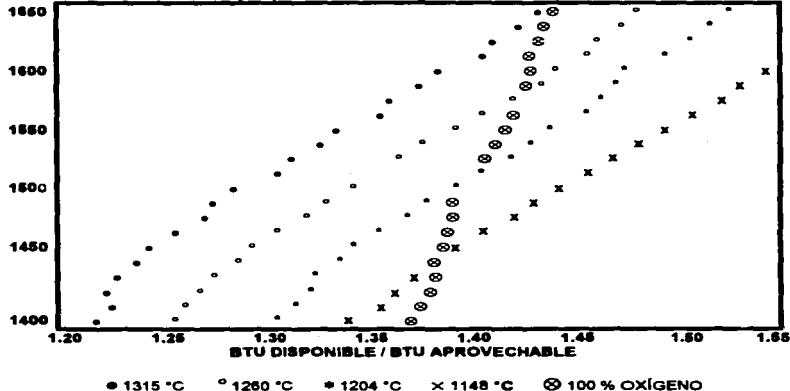
**Curva 4 = 0.95**

**FIGURA 50 : Efecto de la Temperatura de Aire de Combustión en Emisiones de NOx [30].**

En la figura 51 se observa la relación entre el calor disponible y carga útil ( inverso de la eficiencia térmica ) vs la temperatura de los gases exhaustos dejando la cámara de combustión en la zona del fundidor. Las curvas corresponden a diferentes temperaturas de aire precalentado junto con la curva de 100 % de oxígeno.

Cuando los gases exhaustos o quemados son desalojados a 1460 °C, la curva del aire precalentado a 1149 °C presenta la misma relación de energía disponible - energía aprovechable de la curva de 100 % oxígeno lo cual quiere decir que su eficiencia en esas condiciones es igual. Desalojando los gases quemados a temperaturas menores a 1440 °C se tiene que es más eficiente el horno regenerativo precalentando el aire a 1149 °C y cuando los gases quemados son desalojados a temperaturas mayores de 1460 °C el inverso de la eficiencia térmica es mayor en la curva de 100 % oxígeno.

**TEMPERATURA DE GASES EFLUENTES  
A LA SALIDA DE LA CÁMARA ( °C )**



**FIGURA 51: Comportamiento del Inverso de la Eficiencia Térmica del Horno de Fusión con el uso de Aire Precalentado a Diferentes Temperaturas y 100 % de Oxígeno [30].**

En la práctica se ha obtenido que dependiendo del estado de los puertos en los hornos regenerativos, el rendimiento térmico de ambos sistemas ( regenerativo y oxí-gas ) son casi equivalentes. De la figura 51 se puede inferir que el sistema oxí-gas desde el punto de vista eficiencia térmica, es favorable en aplicaciones de vidrio con temperaturas de operación altas como la fundición de vidrios planos y borosilicato.

El ahorro de combustible reportado en sistemas oxí-gas, se debe principalmente a la ausencia de cámaras regeneradoras y puertos, los cuales radian una cantidad importante de calor hacia el exterior. El ahorro por no usar cámaras es aproximadamente del 5 al 6 %. Este hecho no es una razón de peso para justificar la conversión de un horno regenerativo al sistema oxí-gas. Existen otra serie de reducciones en costos que hacen atractivo la conversión, esto se muestra a continuación:

- A.- **Costos de inversión:** Ahorro en inversión en construcción de cámaras regeneradoras y puertos. Existe ahorro en la compra de material refractario y herraje. Ahorro en la compra de sistemas para reducir o eliminar emisiones contaminantes de partículas como precipitador electrostático el absorbedor o otro equipo para controlar las emisiones de NOx.
- B.- **Costos de operación:** Ahorro en el no mantenimiento en operación del sistema de control de NOx, disposición de residuos del sistema de NOx , limpieza y reparaciones de puertos.

## 5.1. AVANCES TECNOLÓGICOS EN QUEMADORES PARA EL SISTEMA OXI-GAS.

Apesar de que la tecnología del sistema oxi-gas en hornos de la industria vidriera es relativamente nueva, se ha desarrollado e investigado ampliamente en base a experiencias y hornos piloto el comportamiento de los quemadores en el sistema oxi-gas obteniéndose mejoras e innovaciones en los diseños de los quemadores convencionales.

Coming Glass, Combustión Tec, Praxair Inc, Maxon Inc, Korting Hannover AG, entre otras compañías a nivel mundial, han desarrollado tecnología de punta con el objetivo de hacer más eficiente y rentable el sistema oxi-gas.

De los nuevos diseños de quemadores se tienen tres como los más utilizados en el sistema oxi-gas.

- 1.- Quemadores de flama de alta temperatura ( Quemadores Oxi-therm de Maxon / Coming ).
- 2.- Quemadores de bajo Momentum ( Desarrollo de Flama ). ( Cleanfire de Air Products / Combustión Tec. )
- 3.- Quemadores de flama de baja temperatura ( Quemadores UCIG "A" de LINDE ).

### 5.1.1. QUEMADORES DE FLAMA DE ALTA TEMPERATURA

En base a la experiencia obtenida en sistemas oxi-gas, la compañía Coming Glass [29] en la figura 52 muestra dos tipos de quemadores, de los que aseguran satisfacen totalmente los requerimientos para fundir vidrio en hornos oxi-gas de 2 hasta 3000 pies cuadrados de área de fusión. El rango de energía para estos quemadores " Oxi-therm " es :

Combustible	Btu/h	Kw/h
Gas	500,000 - 15,000,000	140 - 4400
Combustóleo	1,000,000 - 18,000,000	293 - 5274

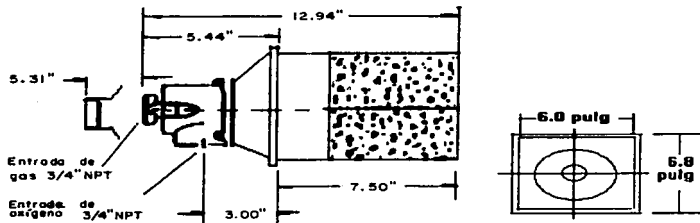
Estos quemadores oxi-therm son adecuados para aplicaciones que requieren alta temperatura dentro de los hornos como en la industria del vidrio. Los NOx que se alcanzan a producir, se mantienen en regiones de alta temperatura por períodos relativamente largos, permitiendo un enfriamiento lento y por consiguiente el " desdoblamiento " de NO en N<sub>2</sub> y O<sub>2</sub>.

Este tipo de quemadores también conocidos como de alto momentum, con velocidades de gases lo suficientemente altas , producen una flama azul transparente con jaspeados luminoso suave y corta de manera que no se "ancle" en el bloc quemador para no dañarlo. Los blocks refractarios del " oxi-therm " estandard son de Zirconia con la opción de Zedmul #20.

Si el quemador debe ser instalado en caliente, el bloc ensamblado al quemador, debe ser precalentado hasta 430 °C antes de colocarse. Los quemadores " oxi-therm " durante el calentamiento del horno deberán operar hasta que se alcancen una temperatura de 800 °C ( a 760 °C se aseguran la ignición continua sin la necesidad de pilotos ), los " oxi-therm " tienen una relación de operación de flujo máximo/mínimo de 5/1.



SERIE 100 OXY-THERM



SERIE 1000 OXY-THERM

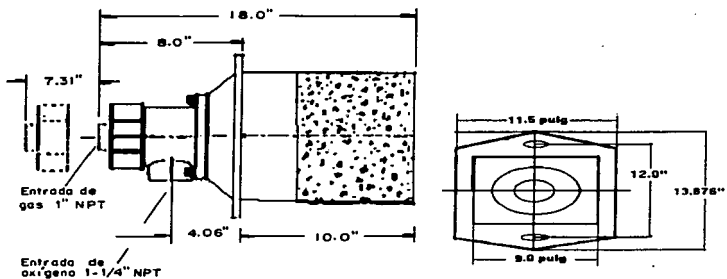


FIGURA 52 : Quemadores Serie Oxy-Therm [29].

Los quemadores "oxi-therm" comúnmente se usan en los sistemas oxi-gas, pero al utilizarlos en sistemas oxi-combustóleo Coming Glass dice [29] que ha logrado reducir las emisiones de NOx. En este caso el combustible es atomizado con 100 % oxígeno para minimizar la formación de NOx.

Coming Glass muestra los resultados que obtuvo en uno de los hornos de Gallo Glass en California después de convertir un horno convencional regenerativo que producía 337 Ton/día de vidrio fundido al sistema oxi-gas, con el cual produce actualmente 339 Ton/día:

PARÁMETRO	% REDUCCIÓN
NOx	84
CO	96
CH4	61
Partículas	28
Ahorro de energía	25

Coming Glass [33], pionero en la tecnología oxi-gas en hornos en la industria vidriera y Maxon Inc. Han instalado más de 200 quemadores del tipo "oxy-therm" en 40 hornos de distintas características y tipos de vidrios producidos. La tecnología oxi-gas se empleó primeramente en hornos pequeños y más tarde en hornos grandes, eliminando regeneradores y recuperadores de calor, cuando se superaron las grandes desventajas y problemas que tenían el sistema en hornos grandes.

Uno de los problemas que principalmente se presentaba en el cambio a oxi-fuel en hornos grandes era el costo de inversión muy alto y cuando se hacía el cambio se tenía problemas con el control de temperaturas, las emisiones de NOx no disminuían en forma considerable, se tenían problemas severos con la eficiencia térmica y el mantenimiento que requería el horno con el sistema oxi-gas era continuo e incosteable.

Coming Glass ilustra en la tabla 52 los beneficios obtenidos con distintos tipos de hornos utilizando el sistema oxi-gas. Menciona que el horno que presenta mayores dificultades para utilizar el sistema oxi-gas es el horno recuperativo con quemadores en las paredes laterales del horno con flamas cruzadas ( Cross-fired ).

**TABLA 52**  
**BENEFICIOS DEL SISTEMA OXI-GAS EN DIFERENTES TIPOS DE HORNOS [33].**

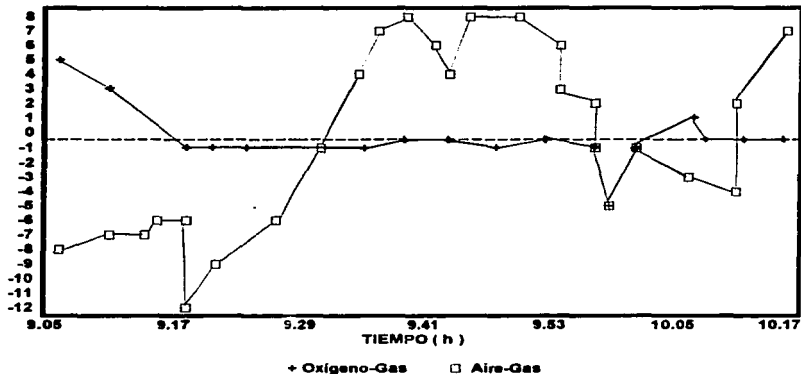
TIPO DE HORNO	TIPO DE VIDRIO	ESTIRAJE Ton/día	Nº DE QUEMADORES OXI-GAS	BENEFICIOS
Recuperativo End-Fire	Fibra Mineral	10	1	16 % de ahorro en combustible.
Recuperativo Cross-Fire	Silicato de sodio	110	2	13 % de incremento en estiraje
Regenerativo End-Fire	Borosilicato	30	2	17 % de incremento en estiraje
Fuego Directo	Borosilicato	15	2	50 % de incremento en estiraje
Recuperativo Cross-Fire	Fibra de vidrio	15	2	12 % de incremento en estiraje

Uno de los problemas que principalmente se presentaba en el cambio a oxí-gas en hornos grandes era el costo de inversión muy alto y cuando se hacía el cambio se tenían problemas con el control de temperaturas, las emisiones de NOx no disminuían en forma considerable, se tenían problemas severos con la eficiencia térmica y el mantenimiento que requería el horno con el sistema oxí-gas era continuo e incosteable.

Pero como observa en la figura 52 estos problemas fueron solucionados. Corning Glass resolvió varios problemas de diseño pero hace notar que al instalar los quemadores "oxy-therm" se resolvieron la mayor parte de los problemas de operación del horno ya que pudieron obtener una mayor estabilidad de temperatura en el horno como se muestra en la figura 53.

En la figura 53 se observa un fragmento ( de intervalo de una hora ) donde el sistema de control marca los valores obtenidos de la temperatura en el horno, registrados con un termopar en la bóveda.

**DESVIACIÓN DEL PROMEDIO DE TEMPERATURA EN LA BÓVEDA ( °C )**



**FIGURA 53 : Desviación de Temperatura entre la Combustión de Oxígeno - Gas y Aire - Gas [33].**

En la planta de Sunderland en West York, Coming Glass [33] diseñó un horno que sustituirá a dos pequeñas unidades de fusión que producen vidrio borosilicato y los beneficios obtenidos al realizar la combustión con el sistema oxi-gas y utilizando los quemadores "oxi-therm" comparándolo con el método tradicional aire-gas son los siguientes:

- 1.- La operación del horno es fácil y el mantenimiento es el normal que se le realiza a cualquier unidad.
- 2.- Las pérdidas de vidrio son reducidas de 8 % a 4 % y la operación del horno es más estable.
- 3.- Las emisiones de NOx por tonelada de vidrio producido se reduce hasta un 90 %.
- 4.- Las partículas emitidas por tonelada de vidrio producido es reducido hasta un 80 %.
- 5.- El consumo de energía es de 50 % menor comparado con un horno similar ubicado en Francia que utiliza para su combustión un sistema con aire-gas.
- 6.- Se disminuye la volatilización de los componentes de la carga, particularmente los componentes del boro reduciendo los costos de materia prima de 1 a 2 %.
- 7.- Se abaten los gastos de inversión y mantenimiento si se tuviera equipo para la eliminación o control de emisiones contaminantes.
- 8.- La campaña del horno se incrementa de cuatro años a seis años, originando un ahorro considerable en reparación prematura de horno.

Considerando el costo alto inmediato de inversión que implica construir o modificar un horno al sistema oxi-gas y el costo elevado permanente del oxígeno, las compañías que utilizan este tipo de hornos realizan un balance de los beneficios que se obtienen con el sistema oxi-gas; el costo por tonelada de vidrio es menor que con el sistema tradicional.

#### **5.1.2. QUEMADORES DE BAJO MOMENTUM ( DESARROLLO DE FLAMA ).**

Este es otro caso interesante de tecnología en quemadores utilizando en sistema oxi-gas por Schuller International Inc. En Waterville, Ohio, E.U.A. [32]. A principios de 1991 experimentaba problemas en emisiones contaminantes con uno de sus hornos recuperativos que producía fibra de vidrio utilizando vidrio de borosilicato. La compañía consideró varios sistemas y equipos para el control de emisiones, como la utilización de un precipitador electrostático, equipos de filtración o incluso la alternativa de una conversión total al horno eléctrico.

Se consideró que los sistemas de control estudiados reducían las emisiones de partículas pero no de NOx. Si se reducían ambas, no cumplían todos los requerimientos ecológicos deseados a futuro, el sistema ideal resultaba incosteable según los resultados del estudio.

Schuller International recurrió a Combustion Tec. ( Orlando, Florida, E.U.A. ) y Air Products and Chemical Inc. ( Allentown, Pennsylvania, E.U.A. ) para que la ayudaran a resolver su problema. Las empresas sugirieron convertir el horno al sistema oxi-gas, pero se encontraron que en el sistema tradicional oxi-gas se producían problemas serios de corrosión en las boquillas de los quemadores y la filtración de gases del horno dentro de los bloques para quemadores producían serios daños en el material refractario.

Schuller solucionó el problema de los bloques instalando bloques de Zirconia. El problema es que el costo de este tipo de material refractario es casi tres veces mayor al del material que normalmente se usaba. También Schuller experimentó problemas constantes de operación con los quemadores para el sistema oxi-gas, lo cual originaba flamas largas y de alta temperatura que ocasionaban el efecto de "lavado" sobre la pared de enfrente del horno.

Estos problemas y otros más que se presentaron, de mantenimiento y de la calidad de vidrio obtenida, se le presentaron a Air Products y Combustion Tec, los cuales al evacuar el problema sugirieron sustituir los quemadores que se utilizaban por un sistema de quemadores que se habían probado en el laboratorio denominado " Cleanfire".

En abril de 1991 se instaló este tipo de quemadores en el horno de Schuller International con el sistema oxí-gas al 100 %. Los nuevos quemadores fueron más fáciles de operar y no requieren de un mantenimiento continuo como los que se utilizaban anteriormente. En base a los buenos resultados obtenidos, Schuller decidió convertir sus restantes hornos al sistema oxí-gas empleando los quemadores del tipo " Cleanfire ".

Antes de la conversión al sistema oxí-gas el horno contaba con:

- 1.- 32 quemadores con mezcla aire-gas, el aire es precalentado a 590 °C por medio de un recuperador metálico.
- 2.- Los gases de combustión a la atmósfera salían a una temperatura de 1310 °C.
- 3.- Dos cargadores de carga, uno en cada lado del horno.
- 4.- Sistema de burbujeadores en el fundidor para ayudar a generar corrientes de convección en el vidrio.
- 5.- Ayuda eléctrica necesaria para mantener la relación de estiraje y calidad del vidrio adecuado.
- 6.- Las emisiones de partículas se incrementaban proporcionalmente con el incremento de producción. Este incremento de partículas también se debía a volatilización de materia prima.
- 7.- Esta volatilización de material repercutía considerablemente en costos, ya que la materia prima que contiene el óxido de boro es muy cara.
- 8.- Las emisiones registradas de NOx con el sistema aire-gas eran de 6.6 libras de óxido de nitrógeno por tonelada de vidrio producido.

A continuación se resumen los cambios y resultados obtenidos en el horno de Schuller cuando se cambia al sistema oxí-gas:

<b>CARACTERÍSTICAS</b>	<b>BENEFICIOS</b>
Área de fusión	No cambia
Área de chimenea	Se reduce hasta un 90 %
Estiraje	Se incrementa hasta un 25 %
Número de quemadores	Se reduce un 50 %
Temperatura de gases emitidos a la atmósfera	Se reduce de 1310 °C a 800 °C
Eficiencia de energía del horno	Se obtiene casi el doble
Ayuda eléctrica	No cambia
Consumo de gas / Ton de vidrio fundido	Se reduce 48 %
Volumen de flujo de gas	Reducción del 84 %
Libras NOx / Ton de vidrio fundido	Se reduce hasta un 70 %
Libras de partículas / Ton de vidrio fundido	Se reduce en promedio un 60 %

El quemador " Cleanfire " usa una novedosa técnica, que involucra una combustión parcial de la flama en un especial pre-combustor refractario. La función de este pre-combustor es con velocidades muy bajas y tiempos de residencia largos fraccionar o quebrar ( " Crackear " ) el gas natural en pequeños componentes de hidrocarburos ( Carbón e Hidrógeno ), esto con el objeto de minimizar las temperaturas pico de la flama y provocar la formación de partículas finísimas de carbón cuya incandescencia provee la alta luminosidad a la flama, hecho que permite una mayor y mejor transferencia de calor hacia el horno.

Otra ventaja de utilizar este tipo de quemador es que al iniciarse la combustión en el pre-combustor, la temperatura de los gases de reacción se incrementa rápidamente causando una expansión del gas. Este incremento de presión en el pre-combustor evita un retroceso de flujo de partículas volátiles y gases corrosivos dentro de las boquillas de los quemadores.

El efecto de retrasar el mezcladío entre el gas natural y el oxígeno provoca que las partículas de carbón por ser " sólidos " radian en un espectro continuo, dando más uniformidad, a diferencia de los gases ( CO<sub>2</sub> y vapor de agua ), que radian por " saltos " o bandas en el espectro de la radiación térmica.

Al no alcanzar la temperatura pico de flama, los NO<sub>x</sub> son minimizados y se elimina la necesidad de bloc-quemador hecho de refractarios costosos de alta temperatura, será suficiente que el bloc sea de un material resistente a la corrosión.

El diseño de quemador permite una operación libre de mantenimiento, en el caso de posibles acumulaciones de escoria y volátiles en la boquilla del quemador. Se tiene gran versatilidad para el control de flujo máximo al mínimo ( Relación 20/1 ).

Una característica ya común en todos los quemadores que se utilizan en el sistema oxi-gas, es la de autoenfriarse con los mismos flujos de oxígeno y gas natural, evitando así los costos de mantenimiento e instalaciones con sistemas de enfriamiento con agua para los quemadores. Las características del quemador " Cleanfire " contra el quemador convencional para oxi-gas son mostrados en la tabla 53.

**T A B L A 53**

**COMPARACIÓN DE QUEMADORES OXI-GAS USADOS  
EN HORNOS DE FUSIÓN DE VIDRIO [32].**

<b>CARACTERÍSTICAS DE OPERACIÓN EN HORNO</b>	<b>CONVENCIONAL QUEMADOR OXI-GAS</b>	<b>QUEMADOR " CLEANFIRE "</b>
Luminosidad alta de flama	No	SI
Mantenimiento continuo	SI	No
Velocidad de flama baja	No	SI
Requerimientos de presión baja	No	SI
Enfriamiento con agua	SI	No
Ajustabilidad de flama	No	SI
Utilización con diferentes combustibles	No	SI

Air products midió las emisiones de NO en un horno piloto utilizando quemadores " Cleanfire ". Estas mediciones fueron hechas utilizando una relación de 2.05 oxígeno-gas con diferentes concentraciones de nitrógeno en el gas, la temperatura de trabajo en el horno se mantuvo en 1480 °C, los resultados obtenidos se muestran en la figura 54.

Lb NO / Ton vidrio

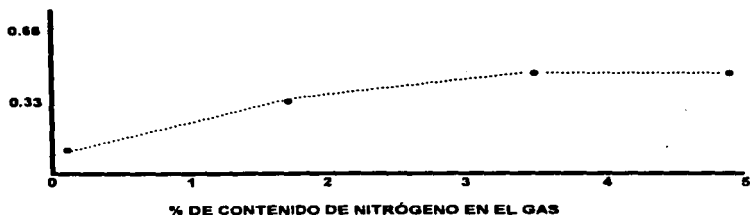


FIGURA 54 : Determinación Experimental de Formación de NO con el Quemador " Cleanfire ".

### 5.1.3. QUEMADOR DE FLAMA DE BAJA TEMPERATURA.

Los quemadores de flama de baja temperatura o quemadores UCIG "A" de LINDE [30], la temperatura baja se logra por medio de una recirculación de gas en el interior del quemador, causado por chorro de oxígeno de alta velocidad. Estos son adecuados para aplicaciones de temperatura de operación por debajo de los 1350 °C, como en el caso de la industria del aluminio.

La producción de NO<sub>x</sub> es influenciada de la misma manera que en un quemador convencional, es decir cuando opera en ambientes arriba de 1350 °C, los NO<sub>x</sub> son incrementados. Este tipo de quemador no es muy aplicado en sistemas oxí-gas en la industria del vidrio. Wemer Sieger señala [ 34 ] que este tipo de quemadores ofrecen mayor eficiencia en sistemas aire - gas, al utilizar aire precalentado de 1100 °C a 1200 °C.

Como se observa, en la actualidad se cuenta con la tecnología disponible para utilizar el sistema oxí-gas en hornos de la industria vidriera que emplean para su combustión aire-gas obteniendo buenos resultados. La expansión de esta tecnología a nivel mundial ha estado frenada por dos aspectos, uno es el costo del oxígeno y el segundo son las exigencias ecológicas de los países o ciudades.

El sistema criogénico PSA / VSA que produce oxígeno, reduce significativamente el costo del oxígeno, lo cual ha generado que en E.U.A [37]. donde las legislaciones ambientales son muy estrictas el sistema oxí-gas sea hasta este momento la opción más adecuada y rentable para asegurar la permanencia de las plantas de vidrio en E.U.A. y especialmente en el estado de Florida.

Con excepción de Alemania, Inglaterra y Japón, la mayoría de países europeos y latino americanos donde las legislaciones ambientales no son muy estrictas o inclusive se dice que están adecuadas a las emisiones que generan los hornos con el sistema de combustión convencional aire-gas, no ha sido muy atractivo cambiar sus hornos al sistema oxí-gas.

## 5.2. TECNOLOGÍA PARA REDUCIR EL COSTO DE OXÍGENO

AGA Gas Inc de Cleveland, Ohio, E.U.A. [35] a principios del año de 1990 en sus últimos equipos generadores de oxígeno ha hecho que los homós con el sistema oxí-gas en la industria del vidrio sean más rentables. La nueva tecnología de generadores de oxígeno económicos ( No criogénicos ) proporcionan un flujo constante y una pureza de oxígeno hasta del 95 % lo cual cumple con las necesidades para el sistema oxí-gas.

La principal fuente de oxígeno es el aire por licuetaación, destilación y en algunos casos se obtiene por electrólisis. La tecnología de adsorción es otro método de tomar oxígeno del aire. El aire como se sabe es una mezcla de gases de nitrógeno ( 79 % ), oxígeno ( 21 % ), gases raros y otros.

En la tabla 54 se muestra la calidad del aire que variará dependiendo del tipo de localidad. En zonas industriales e incluso las urbanas, la cantidad de bióxido de carbono y otros contaminantes es considerablemente más alta que en las zonas rurales.

AGA Inc. Para generar oxígeno por medio de la tecnología de adsorción en su proceso comprime la presión de aire alimentado al sistema ( para está compresión del aire se utiliza el término " Pressure Swing " ) y posteriormente se hace pasar por un material adsorbente.

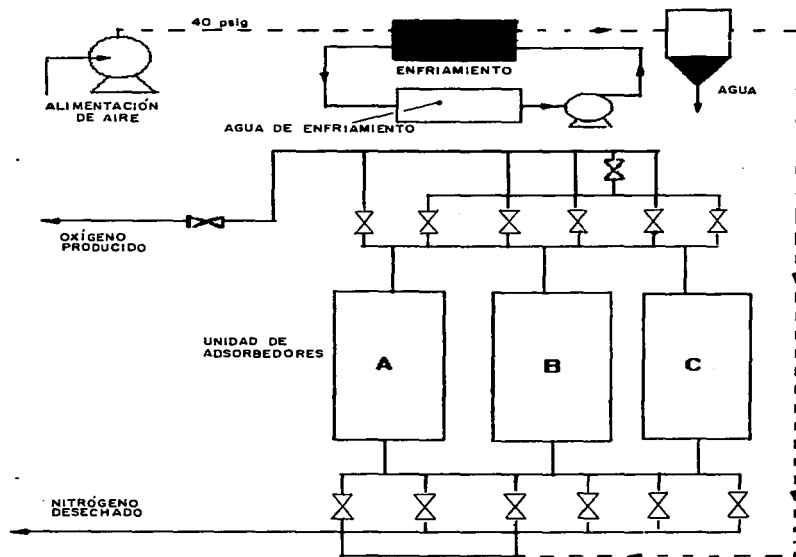
Este proceso es mejor conocido como " Pressure Swing Adsorption " ( PSA ), existen otros que son muy similares que se les conoce como " Vacuum Swing Adsorption " ( VSA ) y " Pressure Vacuum Swing Adsorption " ( PVSA ). Cada técnica tiene diferentes beneficios en la cantidad y calidad de oxígeno para el homo oxí-gas.

**T A B L A 54**  
**CANTIDAD DE GASES EN 1,000,000 PIES CÚBICOS DE AIRE SECO [35].**

G A S	CANTIDAD PIES CÚBICOS	%
Nitrógeno	780,840	78.08
Oxígeno	209,460	20.94
Argón	9,340	0.93
Bióxido de carbón	350	0.35
Neón	18.21	0.02
Helio	5.24	0.005
Kriptón	1.14	0.001
Hidrocarburos	1.00	0.0009
Hidrogeno	0.50	0.0005
Xenón	0.087	0.00008
Acetileno	0.01	0.000009

En la figura 55 se muestra el diagrama de flujo de un sistema generador de oxígeno mediante el proceso PSA. El proceso para producir oxígeno con esta tecnología es muy simple, el aire se alimenta a un compresor y es comprimido a 40 psig, al salir se utiliza un sistema enfriador el cual remueve el calor generado por la compresión y entonces condensa la humedad del aire, para eliminar los condensados se emplea un separador de agua como se muestra en el diagrama de flujo.





**FIGURA 55 : Diagrama de Flujo de un Sistema Generador de Oxígeno PSA ( Pressure Swing Adsorption ).**

Jacques Ribesse, Jarix, en Bruselas Bélgica [36] menciona que el oxígeno puede utilizarse en todo tipo de hornos en la industria vidriera trayendo muchos beneficios.

Lo importante que muestra son los costos de producción por tonelada de vidrio que se reducen en una planta de vidrio que produce envases de vidrio sódico-cálcico en un horno regenerativo con puertos traseros y utiliza como combustible gasóleo al utilizar 10 toneladas de oxígeno, cuando cambia su horno a un sistema oxi-combustión obteniendo los resultados mostrados en la tabla 55.

**TABLA 55**

**COMPARACIÓN DE COSTOS DE PRODUCCIÓN POR TONELADA DE VIDRIO DEL SISTEMA AIRE-COMBUSTÓLEO Y OXIGENO-COMBUSTÓLEO.**

<b>CONDICIONES DE OPERACIÓN</b>	<b>CONVERSIÓN AL SISTEMA OXI-COMBUSTÓLEO</b>	
	<b>ANTES</b>	<b>DESPUÉS</b>
Estiraje Ton / día	120	150
Consumo de combustible Ton/día	20	22
Ayuda eléctrica	Si	Se elimina
Consumo de energía KWh/día	6400	0
Consumo de oxígeno Ton/día	-	10
Costo de tonelada de combustible (dóls.)	161.09	161.09
Costo de Kwh de energía ( dóls.)	0.096	-
Costo de la tonelada de oxígeno (dóls.)	-	65.60
Costo de tonelada de vidrio producido (dóls)	32	28

Esta reducción buena en costos de la tonelada de vidrio producido se debe a que Jacques Ribesse hace más eficiente el equipo generador de oxígeno y reduce el costo de oxígeno de 109 dólares la tonelada de oxígeno a sólo 65.6 dólares, como se muestra en la tabla 55, Jacques Ribesse menciona que todavía se pueden reducir el costo de la tonelada de oxígeno producido a 65 dólares si el gasto de oxígeno es de 45 toneladas por día.

Como se observa en la tabla 55, la ganancia de convertir el horno tradicional al sistema oxi-combustóleo a parte de todos los beneficios en reducción de emisiones contaminantes se tiene una ganancia neta de 4 dólares por tonelada de vidrio producido.

Esta ganancia quizás no se vea muy atractiva a simple vista, pero anualmente se tiene un ahorro de 219,000 dólares, con los cuales según Jacques Ribesse la inversión hecha para la conversión al sistema oxi-combustóleo se recuperaría en 2.5 años.

Al realizar el cálculo del costo de la tonelada de vidrio producido con el costo de 109 dólares por tonelada de oxígeno, la tonelada de vidrio producido cuesta 30.89 dólares, que si se compara con los 32 dólares que cuesta con el sistema tradicional, no existe un ahorro considerable para que el empresario le resulte atractivo invertir un capital considerable en la conversión al sistema oxi-gas y sólo lo hacen cuando tienen presiones por legislaciones ecológicas de la ciudad o país donde se encuentre su industria.

Como se observa la importancia que tiene reducir el costo de oxígeno para hacer más atractivo el cambio en la industria vidriera al sistema oxi-gas Jacque Ribesse se ha fijado como meta inmediata producir oxígeno a 60 dólares la tonelada para un consumo de 10 toneladas por día de oxígeno y de 45 dólares la tonelada de oxígeno producido con un consumo de 40 toneladas de oxígeno por día.

En base a lo anterior hornos del tipo regenerativo que producen de 500 a 600 toneladas diarias, que consumirían alrededor de 40 a 50 toneladas de oxígeno diario, podrían ser fuertes candidatos a disponer de esta tecnología de punta con una considerable aportación en su reducción de emisiones en su localidad, generando una buena imagen de su industria y obteniendo utilidades para sus inversionistas.

### **5.3. FUENTES DE NITRÓGENO EN UN HORNO OXI-GAS**

Básicamente se distinguen las siguientes fuentes que aportan nitrógeno en los sistemas oxi-gas en la industria del vidrio:

#### **INFILTRACIÓN DE AIRE EXTERIOR.**

- 1.- Por presiones internas negativas que permiten el ingreso del aire.
- 2.- Aire de enfriamiento a la taza en la línea de metal, debido a un mal sellado entre los blocs de taza y sobretaza.
- 3.- Aire comprimido en los burbujeadores. Si es necesario el uso de burbujeadores, estos deberán trabajar con oxígeno.

#### **NITRÓGENO RESIDUAL EN EL OXÍGENO PRODUCIDO**

El oxígeno producido en una planta criogénica resulta ser el de mayor pureza ( 99.5 % ) con un nitrógeno residual de menos de 100 ppm. El costo se eleva debido a la energía requerida para comprimir el aire y por el transporte al sitio de consumo.

La alternativa, como se indicó anteriormente, para reducir el costo de oxígeno es producirlo en plantas PSA, con una pureza del oxígeno que oscila de un 90 - 95 % de O<sub>2</sub>, 2 - 5 % N<sub>2</sub> y un 5 % de Argón. En la actualidad, con las mejoras en los sistemas PSA se han logrado obtener purezas de O<sub>2</sub> del 98 % y únicamente el 1 % o menos de nitrógeno residual.

#### **NITRÓGENO CONTENIDO EN EL GAS NATURAL**

Se dice que el nitrógeno en el combustible produce más NO<sub>x</sub> que la misma cantidad de nitrógeno contenido en el oxígeno. El nitrógeno contenido en el oxígeno y el gas natural, se vuelven una fuente importante de NO<sub>x</sub> para hornos con buen sello para infiltraciones.

El promedio de N<sub>2</sub> del gas natural de E.U.A. es alrededor del 4 % y el contenido de N<sub>2</sub> reportado en el gas natural por PEMEX son fracciones de porcentajes menores a 1 %.

#### **NITRÓGENO PROVENIENTE DE NITRATOS EN LA MEZCLA**

La mezcla en sí, trae consigo aire atrapado por el proceso de mezclado y el transporte de las materias primas. El nitrato de sodio o potasio utilizado como oxidante - afinante en ciertos vidrios, aporta N<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub> a la atmósfera del horno y se funden a 315 °C, comenzándose a descomponer como Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O, NO y O<sub>2</sub> alrededor de los 370 °C.

# VI

## CONCLUSIONES

## CAPITULO VI

### CONCLUSIONES

En base a lo analizado en el presente trabajo se concluye que para seleccionar el equipo o sistema adecuado para lograr una disminución y/o control de las emisiones contaminantes en la industria del vidrio, se debe estar muy familiarizado con el proceso de la planta.

El Ingeniero Químico es el profesionalista que puede conocer el proceso y por ende, el que tiene la misión de elegir el sistema de control más adecuado para reducir las emisiones contaminantes y debe tener la visión de elegir la mejor opción con el fin de proteger el medio ambiente y garantizar que la planta productiva permanezca activa en el futuro.

Considerando que los homos significan un elemento necesario en la industria del vidrio, es indispensable que cuenten con un sistema que les permita reducir las emisiones contaminantes, por lo que se concluye que la mejor opción a corto y largo plazo es realizar la conversión de los homos tradicionales al sistema "oxi-gas".

Este sistema es el que ofrece mayores ventajas en su operación, mantenimiento, ahorro de energía, materias prima. Además reduce en mayor cantidad las emisiones de NOx que cualquier otros equipos y es el único en el que se puede recuperar el capital de inversión.

Algunas causas de que el sistema oxi-gas ofrezca las ventajas anteriores mencionadas se debe entre algunas otras a que:

1. Tienen una mayor precisión en el control de la temperatura de vidrio:

Se llega a tener una variación como máximo de 2 °C en 24 horas ( temperatura del vidrio ), para el caso de control con computadora. Esto es debido a que la operación de los quemadores es continua, eliminándose las variaciones observadas en los homos tradicionales de la temperatura del puente, así como la presión interna durante los cambios en las cámaras regenerativas.

2. Se logra un mayor control sobre la estequiometría de la reacción:

Se mantiene en todo momento una relación fija de oxígeno/gas, además la mezcla dentro del homo, deja de rotar, observándose un patrón más consistente del avance de la mezcla del homo existiendo menor pérdida de volátiles y de Carry-Over en el horno.

3. Con sistema "oxi-gas" se disminuye en un 75 % el volumen de gases exhaustos, con menos arrastre de materia prima. Se hace posible hablar de una economía de materia prima.
4. De las ventajas más importantes es que en la actualidad es el único sistema que reduce las emisiones de NOx por tonelada de vidrio producido de un 90 a un 97 % y hasta un 80 % en emisiones de partículas. Lo anterior es una garantía para que las plantas sigan operando en el área metropolitana, sin ningún riesgo.
5. Económicamente es el sistema más rentable ya que se obtiene un ahorro mínimo de 4 dólares por tonelada de vidrio producido, con lo cual en un plazo de 2.5 años se puede recuperar la inversión inicial hecha para la conversión, lo que con un equipo tradicional como un precipitador electrostático no se lograría.

Con excelentes resultados, tanto en lo que se refiere a su capacidad de producción como en la preservación del medio ambiente, en México viene operando desde el mes de abril de 1993 un horno "oxi-gas". Se trata de un horno Unit Melter para producir vidrio perfumero con una capacidad de estiraje de 35 ton/día totalmente automático, que cuenta con ayuda eléctrica y alimentador especial para producir vidrio de diferentes colores ( Cristalino, Ámbar, Verde Esmeralda, Azul Cobalto, Azul Agua Marina, etc. ).

Es importante señalar que las emisiones de elementos contaminantes al medio ambiente han logrado reducirse significativamente con el sistema oxi-gas hasta cumplir con los límites especificados en la legislaciones ambientales. Lo anterior es una garantía para que las plantas sigan operando en el área metropolitana, sin ningún riesgo.



## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1].- Fernandez Navarro Jose María; " Los vidrios", Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Madrid España, 1991.
- [2].- Vitro Envases de Vidrio ; " Manual de Hornos de Fundición", México D.F. , Agosto 1995.
- [3].- Sims Richard; " Reducing Pollutant Emission from Container Furnaces " , Glass Production, September 1990.
- [4].- Darwin Charles H ; " Pollution Control in the Glass Industry " , The Glass Industry , July 1979.
- [5].- Asociación de Técnicos y Profesionistas en Aplicación Energetica ; " Memoria del XI seminario nacional sobre el uso racional de la energía y exposición de equipos y servicio " , México D.F, Noviembre 1990.
- [6].- Vitro Envases de Vidrio ; " Evaluación de emisiones de óxido de nitrógeno 1993 " , México D.F., Febrero 1994.
- [7].- Vitro Envases de Vidrio ; " Evaluación de emisiones contaminantes durante 1995 " , México D.F., Febrero 1996.
- [8].- Vitro Envases de Vidrio ; " Reporte de reducción de NOx y partículas " México D.F, Julio 15, 1995.
- [9].- PEMEX; " Manual informativo de Gasoleo Industrial " , México D.F. 1992.
- [10].- Pont R. S. ; " Pollution Control by Burner Desing and Operation " , Glass Technology, Vol. 32, N°3 June 1991.
- [11].- Gutersohn Heinrich; " Emission limits of Air Pollution " , Glass Production Technology International, November, 1992.
- [12].- Secretaria de Desarrollo Social; " Proyecto de Norma Oficial Mexicana NOM-SEDESOL-CCAT- / 93, México D.F, Julio 19, 1993.
- [13].- Diario oficial de la federación; " Norma Oficial Mexicana NOM-097-ECOL-1995 " , Tomo DIX, N°1, Jueves 1 Febrero, 1996.
- [14].- Brimblecombe Peter, " Air Composition Chemistry " , Editorial Cambridge - University Press, London, 1986.
- [15].- Mackenzie L. Davis and David A. Cornwell; " Introduccion to Environmental Engineering " , Editorial Mcraw-Hill International Edition, 2° Edición, 1991.
- [16].- Parker , Dean H. ; " Enciclopedia de química industrial", Manual de Toxicología Industrial , Tomo 12, Editorial Urmo, Bilbao España, 1988.
- [17].- Spedding D.J. ; " Contaminación Atmosférica " , Editorial Reverte, España, 1981.
- [18].- Neff Glenn C; " Reduction of NOx Emissions by Burner Application and Operational Techiques " , Glass Technology ,Vol. 31, N° 2, April 1990.
- [19].- Neff Glenn C., Sr M.L Joshi, M.E Tester and S.K Panahi; " Reduction of NOx Emissions by Burner Application and Operational Techiques " , Glass Technology, Vol. 31, N° 2, April 1990.



- [20].- Dr. Clark C., Monks King, Taudevin & Gregson Ltd; " Criterios de selección ", Latinoamericana de Vidrio, Noviembre 1989.
- [21].- Mr. Portener D. ; " All-Round, Energy Efficient Melter ", Glass, January 1992.
- [22].- Lehman Richard L. And William H. Manning ; " Glass Batch Wetting Water ", Journal of the Canadian Ceramic, Nov-Dec. 1977.
- [23].- Parke Albert; " Contaminación del Aire por la Industria ", Editorial Reverte, España, 1983.
- [24].- Heap Brian ; " Too Little, Too Late ? ", Glass, January 1992.
- [25].- Klamp G. ; " Methods of Treating Gaseous Emissions from Glass Furnace ", Glass Production Technology International, November, 1991.
- [26].- United McGill Corp. ; " Controlling Acid Gases from Glass Furnaces ". Glass International, September 1990.
- [27].- Teller A.J. ; " Control of Glass Furnace Emissions", The Glass Industry, February 1976.
- [28].- Laurenceaus and Bernard ; " French All - Oxygen Conversion Trials ", Glass International, March 1993.
- [29].- Brown Jhon T. ; " A second Revolution in Glass Melting Technology " Glass International, March 1993.
- [30].- Vitro Envases de Vidrio ; " Manual del Sistema Oxi - Fuel ( NOx)",México D.F., Septiembre 1994.
- [31].- Praxair NV and Union Carbide Industrial Gases ; " Overview of Oxygen use in Glass Melting " Glass International , March 1993.
- [32].- Shamp Donald E. ; " Emission Control on a USA Gassfibre Furnace ",Glass International, March 1993.
- [33].- Ibbotson Andy ; " Rise of Oxy-Fuel Systems from Small to Large Furnaces " , Glass International, March 1993.
- [34].- Sieger Werner and Horst Nähler ; " Reducing NOx Emission at Glass Melting Furnaces " , Glass Production Technology International, November 1991.
- [35].- Humbert Howard; " Three-Way Developments in Oxygen Melting Technology ". Glass International, March 1993.
- [36].- Jacques Ribesse Inc. ; " Advances in Low Cost Oxygen Generation ", Glass International, March 1993.
- [37].- Laurenceau Sege, Etienne Lepoutre and W. Petrie; " Technical Developments for Cost - Effective Oxy-Fuel Glass Melting ", Glass , October 1993.