



TOGETHER
for a sustainable future

OCCASION

This publication has been made available to the public on the occasion of the 50th anniversary of the United Nations Industrial Development Organisation.



TOGETHER
for a sustainable future

DISCLAIMER

This document has been produced without formal United Nations editing. The designations employed and the presentation of the material in this document do not imply the expression of any opinion whatsoever on the part of the Secretariat of the United Nations Industrial Development Organization (UNIDO) concerning the legal status of any country, territory, city or area or of its authorities, or concerning the delimitation of its frontiers or boundaries, or its economic system or degree of development. Designations such as “developed”, “industrialized” and “developing” are intended for statistical convenience and do not necessarily express a judgment about the stage reached by a particular country or area in the development process. Mention of firm names or commercial products does not constitute an endorsement by UNIDO.

FAIR USE POLICY

Any part of this publication may be quoted and referenced for educational and research purposes without additional permission from UNIDO. However, those who make use of quoting and referencing this publication are requested to follow the Fair Use Policy of giving due credit to UNIDO.

CONTACT

Please contact publications@unido.org for further information concerning UNIDO publications.

For more information about UNIDO, please visit us at www.unido.org

20823

Distr. RESERVADA

ITPD/R.3
10 mayo 1994

ORGANIZACION DE LAS NACIONES UNIDAS
PARA EL DESARROLLO INDUSTRIAL

ESPAÑOL
Original: INGLES

MANUAL PRACTICO

LA INDUSTRIA DEL VIDRIO

Resultados de un seminario sobre conservación de energía en la industria del vidrio *

1993

Tailandia

Filipinas

Patrocinado por la

Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial (ONUDI)

y el

Ministerio de Comercio Internacional e Industria (MITI) del Japón

Acogido por

Ministerio de Ciencia, Tecnología
y Medio Ambiente de Tailandia

Departamento de Energía
de Filipinas

Organizado por el

Centro de Conservación de la Energía (CCE) del Japón

* El presente documento es traducción de un texto que no ha pasado por los servicios de edición.

PREFACIO

La conservación de energía es una medida esencial que todos podemos tomar para resolver los problemas, cada vez más importantes, de la crisis mundial de la energía y la degradación del medio ambiente. En particular, los países en desarrollo están interesados en que se tenga en ellos una mayor conciencia de la ineficiente generación y utilización de la energía. Sin embargo, por lo común sólo se dispone de fuentes de información limitadas sobre el empleo racional de la energía.

En consecuencia, los conocimientos especializados sobre las modernas tecnologías de ahorro y conservación de energía deberían difundirse entre los gobiernos y los administradores industriales, así como entre los ingenieros y los operarios a nivel de fábrica en los países en desarrollo. Es particularmente importante que todos ellos adquieran un conocimiento práctico de las tecnologías y técnicas de conservación de energía actualmente disponibles.

En diciembre de 1983, la ONUDI organizó una reunión regional sobre el consumo de energía, así como una reunión de un grupo de expertos sobre conservación de energía en las pequeñas y medianas industrias para los países asiáticos. Durante esas reuniones se señaló que en algunas industrias de gran intensidad de energía podían obtenerse ahorros de hasta un 10% mediante el mejoramiento de los servicios internos de carácter básico, como la auditoría y la gestión de energía.

Todas estas experiencias indujeron a la ONUDI a preparar un programa regional sobre la promoción y aplicación de las tecnologías de ahorro de energía en determinados subsectores, pues el empleo racional de la energía exige una amplia utilización de las tecnologías de conservación de energía en los diversos sectores industriales en los que aquélla se desperdicia. Uno de esos sectores industriales de gran intensidad de energía que deben considerarse para mejorar la eficiencia mediante la introducción de modernas tecnologías de conservación es la industria del vidrio, que consume mucha energía y, en consecuencia, produce grandes cantidades de CO₂. En los últimos años se viene diciendo que el CO₂ generado en enormes cantidades produce un calentamiento de la Tierra y que su efecto sobre el medio ambiente terrestre se está agravando. Para hacer frente a esta situación, se están haciendo en todo el mundo esfuerzos encaminados a reducir la cantidad de CO₂ generado, objetivo que se piensa lograr en el año 2000.

En la industria del vidrio puede mejorarse considerablemente el rendimiento energético mediante el control de la combustión, el aislamiento de las paredes del horno, la recuperación del calor residual, el balance térmico, el empleo del recalentamiento y el burbujeo eléctricos, el calentamiento eléctrico del antehorno, el empleo de gran cantidad de chatarra de vidrio y la técnica de mezclas de baja temperatura de fusión.

La ONUDI está ejecutando actualmente este programa, con el apoyo financiero del Gobierno japonés, en determinados países asiáticos en desarrollo. El programa está encaminado a adaptar esas tecnologías innovadoras de conservación de energía, desarrolladas en el Japón, a las condiciones de los países en desarrollo.

En dicho programa consideramos que la transferencia de esas tecnologías podría conseguirse mediante:

- i) La realización de estudios sobre la utilización de la energía y el rendimiento energético a nivel de fábrica;
- ii) La preparación de manuales prácticos sobre la gestión de energía y las tecnologías de conservación y ahorro de energía, basados en los resultados de dichos estudios;

- iii) La presentación y análisis de los manuales prácticos en seminarios dirigidos a funcionarios gubernamentales, representantes de las industrias, directores de fábricas e ingenieros;
- iv) La difusión de los manuales prácticos en otros países en desarrollo para su debida utilización y aplicación por el sector industrial.

La experiencia adquirida mediante este programa se aprovechará para otros programas o proyectos concernientes a otros sectores industriales y a otros países y regiones en desarrollo.

La ONUDI inició este programa con el proyecto US/RAS/90/075 - Utilización racional de los recursos energéticos en la industria del acero y en la industria textil de Malasia e Indonesia, que fue seguido del proyecto US/RAS/92/035 - Utilización racional de las tecnologías de ahorro de energía en las industrias de la pulpa/papel y del vidrio de Filipinas y Tailandia.

El presente manual práctico sobre la industria del vidrio ha sido preparado por la ONUDI, con la cooperación de expertos del Centro de Conservación de la Energía (CCE) del Japón en tecnologías de ahorro de energía, en el marco del citado proyecto de la ONUDI. Se basa en las conclusiones de los estudios realizados, en las observaciones efectuadas a nivel de fábrica y en las recomendaciones y sugerencias formuladas por los seminarios sobre conservación de energía en la industria del vidrio celebrados en virtud del mismo proyecto en Bangkok (Tailandia) y Manila (Filipinas) en enero y febrero de 1993, respectivamente. El manual práctico no sólo interesará a los gobiernos y a los representantes de la industria, sino también a los ingenieros y operarios de fábricas de países en desarrollo, pues ha sido concebido especialmente para estos últimos como ayuda para mejorar el rendimiento energético en el proceso de producción.

Deseamos dar las gracias a las siguientes instituciones por su valiosa contribución, que ha hecho posible la preparación y publicación del presente manual:

Departamento de Energía, Filipinas
Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente, Tailandia
Ministerio de Comercio Internacional e Industria (MITI), Japón
Centro de Conservación de la Energía (CCE), Japón.

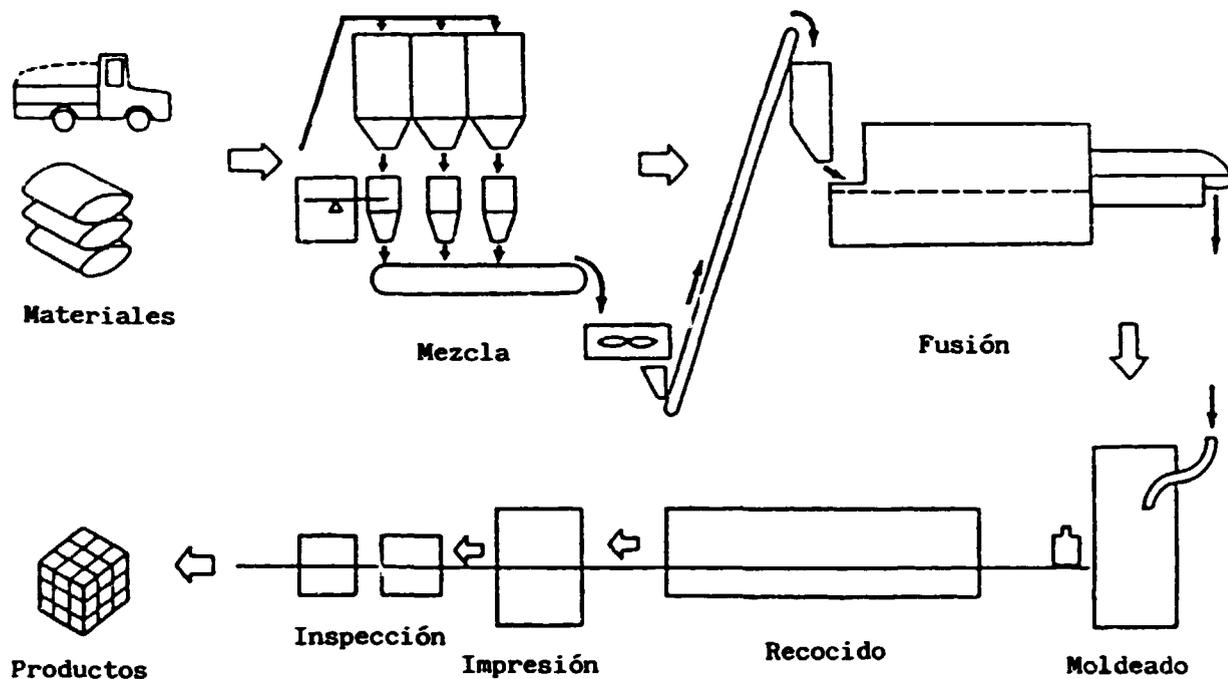
Julio de 1993

INDICE

	<i>Página</i>
Prefacio	i
1. El proceso de producción de la industria del vidrio	1
2. Las características del consumo de energía en el proceso de producción del vidrio	2
3. La promoción de la tecnología de conservación de la energía	7
3.1 El horno de fusión	7
3.1.1 El control de la combustión	10
3.1.2 El aislamiento	17
3.1.3 La recuperación del calor de los gases de escape	19
3.2 El horno de recocido	22
3.3 El balance térmico (en los hornos de fusión y de recocido)	24
3.4 Otras medidas	29

1. El proceso de producción en la industria del vidrio

La industria del vidrio consume mucha energía. Se queman combustibles para producir una elevada temperatura dentro del horno, donde la mezcla reacciona, se vitrifica, se desgasifica y se homogeniza para extraerla en forma de productos (por ejemplo botellas de vidrio, cristal de mesa). Los productos se introducen en el horno de recocido para su temple, y las superficies se imprimen según convenga. Luego se introducen en el horno de cocción. De este modo, cada uno de esos procesos utiliza un horno que consume mucha energía. En la Figura 1 se representa el proceso típico de fabricación de una botella.



Proceso de fabricación (botella)

Figura 1

Los combustibles fósiles (carbón, petróleo, gas natural) en cuanto fuentes de energía son recursos limitados que deben conservarse para las futuras generaciones en la mayor medida posible. La combustión de estos materiales libera en la atmósfera SO_x y NO_x , lo que afecta a la salud humana. Esto ha planteado graves problemas. En los últimos años se viene afirmando que el CO_2 generado en enormes cantidades produce un calentamiento de la Tierra y que el efecto sobre el medio ambiente está adquiriendo graves dimensiones. A fin de remediar esa situación se están haciendo esfuerzos en todo el mundo para reducir la cantidad de CO_2 generado, con el objetivo situado en el año 2000.

Los esfuerzos de ahorro o conservación de la energía en las actividades industriales están directamente vinculados al objetivo de controlar el aumento del costo derivado de la reducción del consumo unitario de energía en la industria, lo que conduce a una intensificación de la competencia. Al mismo tiempo, esos esfuerzos ofrecen medios esenciales para el mejoramiento del medio ambiente mundial de modo que el ser humano pueda mantener su salud a largo plazo. Es imperativo que los empresarios comprendan que la conservación de la energía es una de las políticas más importantes para su industria, para su país y para el mundo entero.

2. Las características del consumo de energía en el proceso de producción del vidrio

La Figura 2 ilustra la proporción que representa el costo de la energía en el costo de producción total de una botella de vidrio en las fábricas en 1973, inmediatamente antes de la primera crisis del petróleo, en 1981, después de la segunda crisis del petróleo, y en 1989. A pesar de los esfuerzos de conservación de la energía, esa proporción aumentó del 9% en 1973 al 16,7% en 1981 debido a la vertiginosa subida del costo del petróleo. La proporción se redujo al 8,6% en 1989 debido a los esfuerzos de conservación de la energía y al descenso del precio del petróleo.

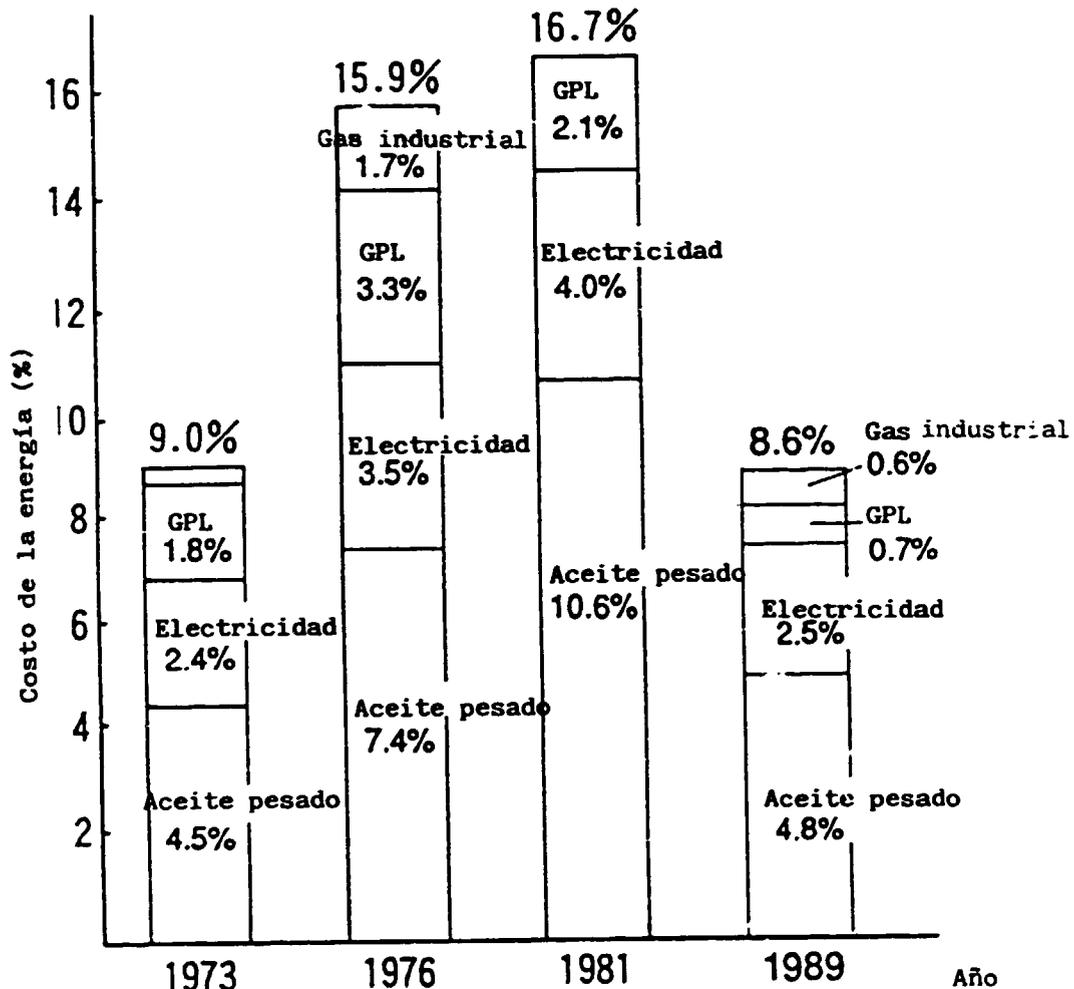


Figura 2 Distribución del costo de la energía en el costo total de fabricación de una botella de vidrio

Fuente: New Glass Tech Vol.3 (1983), Núm.4, Industrial Statistics (1989), Oil Consumption Statistics (1989)

El costo de la energía en 1981 puede desglosarse como sigue:

Aceite pesado	11%
Energía eléctrica	4%
GPL	2%

La conservación de la energía en cada una de sus fuentes es una importante tarea que debe resolverse para la reducción del costo.

La Figura 3 representa el consumo de energía en cada proceso.

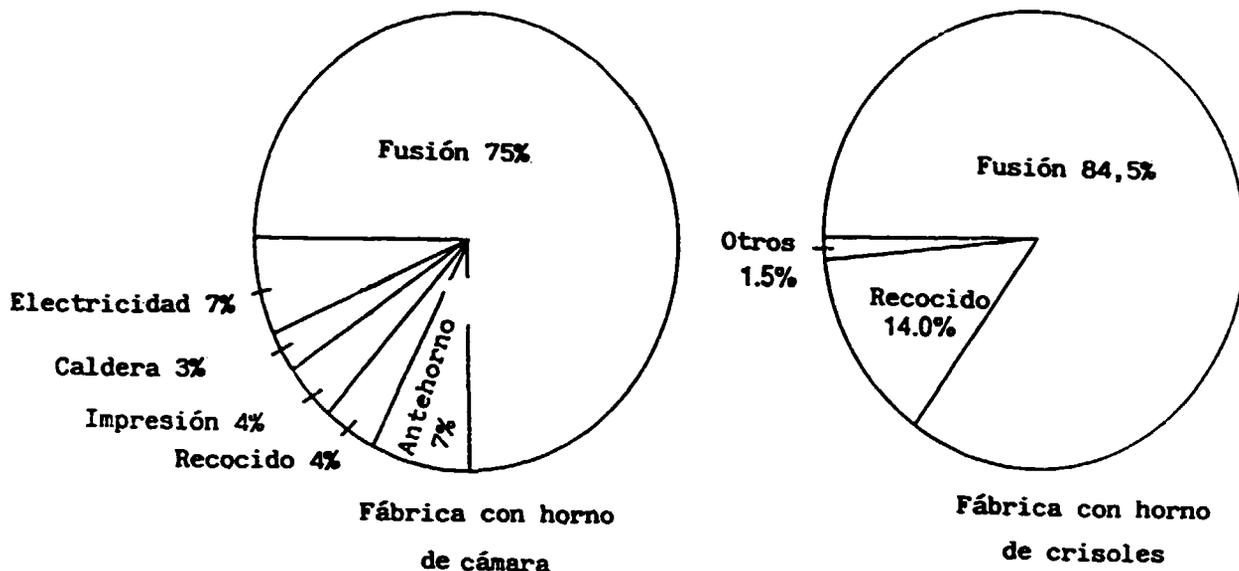


Figura 3 Distribución del consumo total de energía

La situación difiere según los tipos de productos y las escalas de producción; la Figura 3 muestra ejemplos de la fábrica de botellas de vidrio equipada con horno de cámara y de la fábrica pequeña provista de horno de crisoles.

El proceso de fusión es el que consume más energía tanto en la fábrica equipada con horno de cámara para la producción continua como en la planta provista de horno de crisoles para la producción de pequeñas cantidades de múltiples tipos de productos.

La figura indica el 75% para el horno de cámara e incluso llega al 82% si se añade el 7% para el antehorno. En el caso del horno de crisoles se consume más energía, cerca del 85%.

En consecuencia, cuando se hacen esfuerzos de conservación de la energía debe darse la máxima prioridad al horno de fusión y luego al horno de recocido.

El consumo unitario de energía significa la energía necesaria para fabricar la cantidad unitaria de producto (1kg o 1t). Se expresa como consumo unitario de energía si ésta se utiliza como unidad o como consumo unitario de combustible si la cantidad de éste se utiliza como unidad.

Básicamente, la conservación de la energía en la fábrica de vidrio consiste en reducir el consumo unitario de energía.

Para reducir el consumo unitario de energía es necesario reducir la cantidad de combustibles utilizados, aunque también es importante aumentar la producción sin incrementar la cantidad de combustibles, y reducir la tasa de producción defectuosa, consiguiendo así un aumento de producción en la fase final.

El consumo específico de energía incluye toda la energía utilizada para fabricar el producto: los hidrocarburos, tales como aceite pesado, GPL y queroseno, la energía eléctrica utilizada para el transporte, etc.

El Cuadro 1 muestra un ejemplo del consumo de energía y de combustible en cada proceso de la fábrica de botellas de vidrio. Es necesario que la dirección tenga una visión total de esta situación. Respecto de cada proceso de la fábrica se debe conocer el consumo unitario de combustible o el consumo unitario de electricidad que se efectúa en cada sección.

Cuadro 1 Distribución del consumo de energía en la fabricación de botellas de vidrio

x 10⁻⁴ kcal/t vidrio

	Aceite pesado	Queroseno	GPL	Gas industrial	Electricidad	Total	%
Mezcla					1,47	1,47	0,58
Fusión	161,80				16,96	178,76	71,03
Antehorno	1,77		14,76		0,80	19,33	6,89
Moldeado				0,08	26,85	26,93	10,70
Recocido			9,59		2,86	12,45	4,95
Impresión, manipulación			6,32	0,09	1,54	7,95	3,16
Embalaje					0,47	0,47	0,19
Otros	0,05	0,02	0,32	0,14	3,58	4,11	1,63
Total	163,61	0,02	30,99	0,31	56,74	251,68	
(%)	65,01	0,01	12,31	0,12	22,54		100

En lo que se refiere al horno de fusión, es necesario obtener datos correctos sobre el consumo unitario de energía (o el consumo unitario de combustible), que corresponde al consumo de energía correspondiente a la cantidad de vidrio extraído del horno. Puede expresarse en calorías o en el valor convertido en cantidad de aceite pesado. Cuando se utiliza el recalentador eléctrico, esa cantidad debe incluir la energía eléctrica utilizada por aquél.

Esto se aplica también al horno de recocido. En este caso, el valor se expresa en cantidad de energía consumida por cantidad de vidrio recocido.

El consumo unitario de energía varía considerablemente según la escala de producción. También depende de los tipos de vidrio, pues está relacionado con el nivel de calidad. La Figura 4 ilustra las diferencias en la fábrica de cristal de mesa y en la de botellas de vidrio. La menor escala y el mayor nivel de calidad del producto en la fábrica de cristal de mesa con respecto a la de botellas de vidrio explica que el consumo unitario de energía sea considerablemente mayor en la primera.

En la fábrica equipada con horno de crisoles para la producción de pequeñas cantidades de múltiples tipos de productos, solamente está claro el consumo unitario de energía en el horno: 4.000 a 8.000 kcal/kg. La diferencia depende de los tipos de vidrio, tales como el vidrio de borosilicato, el vidrio de sosa y cal y el cristal, así como del tamaño del horno.

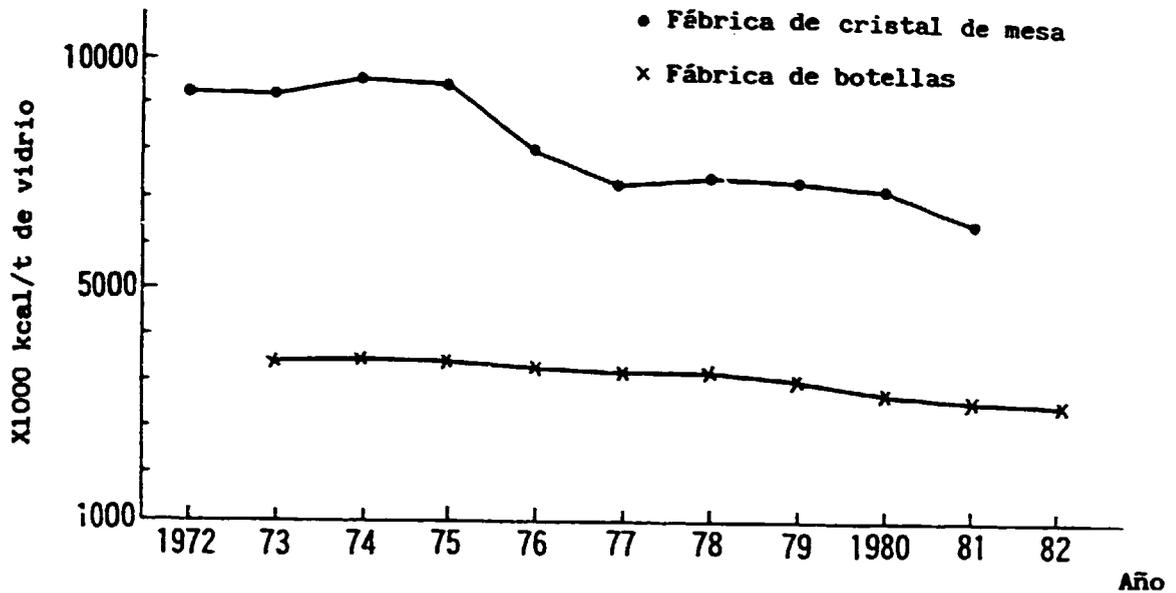


Figura 4 Consumo unitario de energía según el tipo de fábrica

El Cuadro 2 representa la situación del consumo unitario en el caso del horno de recocido. Se observan grandes diferencias según el método de calefacción, el tiempo de tratamiento, el calor del vidrio que se va a cargar y la cantidad de vidrio cargada en función de la capacidad de tratamiento del horno.

Cuando el consumo unitario de energía se compara con el de otras empresas, es necesario conocer cómo se ha determinado la referencia o criterio, así como esclarecer si por energía se entiende la energía total utilizada en la fábrica o sólo en el horno de fusión, si en éste también se ha incluido o no el antehorno y si se ha incluido o no la energía eléctrica.

Cuadro 2 Consumo de energía de los hornos de recocido

Tipo	Combustible	Tiempo de tratamiento (h)	Tiempo de subida Tiempo de reposo (h)	Producción	Estado de entrada	Capacidad (kg/h)	Consumo unitario de energía (promedio mensual) (kcal/kg)
Mufla	Gas	8	4	Copa	Después del moldeado	219	448
Directo	Electricidad	8	4	Copa		219	385
Mufla	Gas	8	4	Copa		156	1.572
Mufla	Aceite	8	16	Lente de cabezal		250	1.861
Directo	Gas	8	2	Lente de cabezal		250	596
Mufla	Gas	24		Botella		360	462
Radiación directa	Gas	8	1	Lente de Grove		180	778
Mufla	Aceite	24		Botella		168	827
Tubo radiante	Gas	8	1	Botella		238	506

Fuente: Guidance of Energy Conservation (1983), The Glass Manufacturing Industry.

La Figura 5 presenta en forma de diagrama la conservación de la energía. Este diagrama debe modificarse con arreglo a las necesidades particulares de cada fábrica.

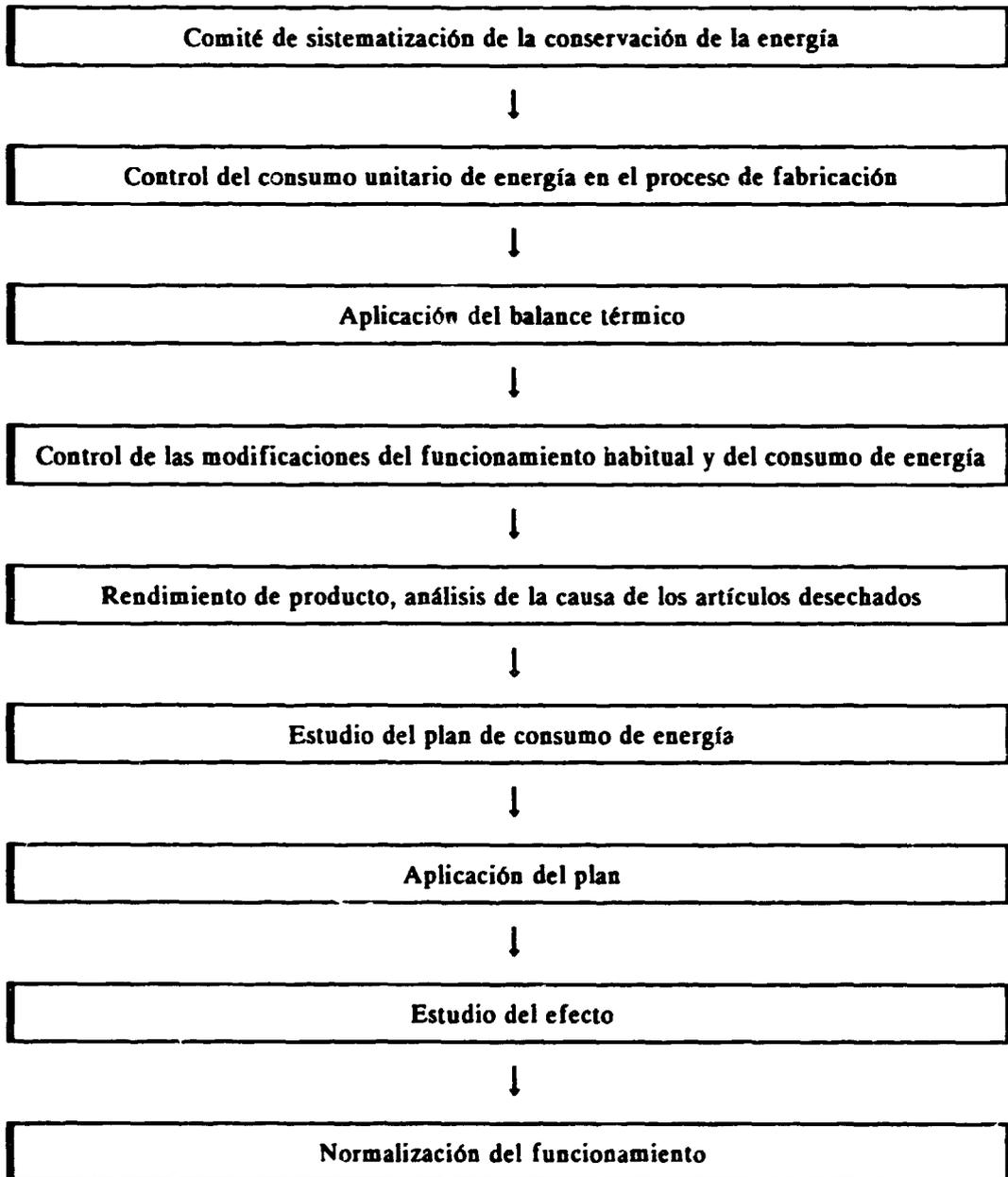


Figura 5 Diagrama de la conservación de la energía

3. La promoción de la tecnología de conservación de la energía

3.1 El horno de fusión

Se dispone de muchos tipos de hornos de fusión para la producción de vidrio. Estos hornos pueden clasificarse a grandes rasgos en los tipos indicados en las Figuras 6 a 10.

La Figura 6 muestra el tipo de puertas laterales. Se trata de un horno grande con una capacidad diaria de 100 a 150 t o más. En ángulo recto con la dirección de la corriente de vidrio hay instaladas dos o más puertas, y la distribución de la temperatura dentro del horno puede cambiarse a un valor deseado controlando la cantidad de combustión en cada puerta; esto permite producir vidrio de alta calidad. Este tipo de horno se utiliza con frecuencia para la producción de vidrio plano o como un gran horno para la fabricación de botellas.

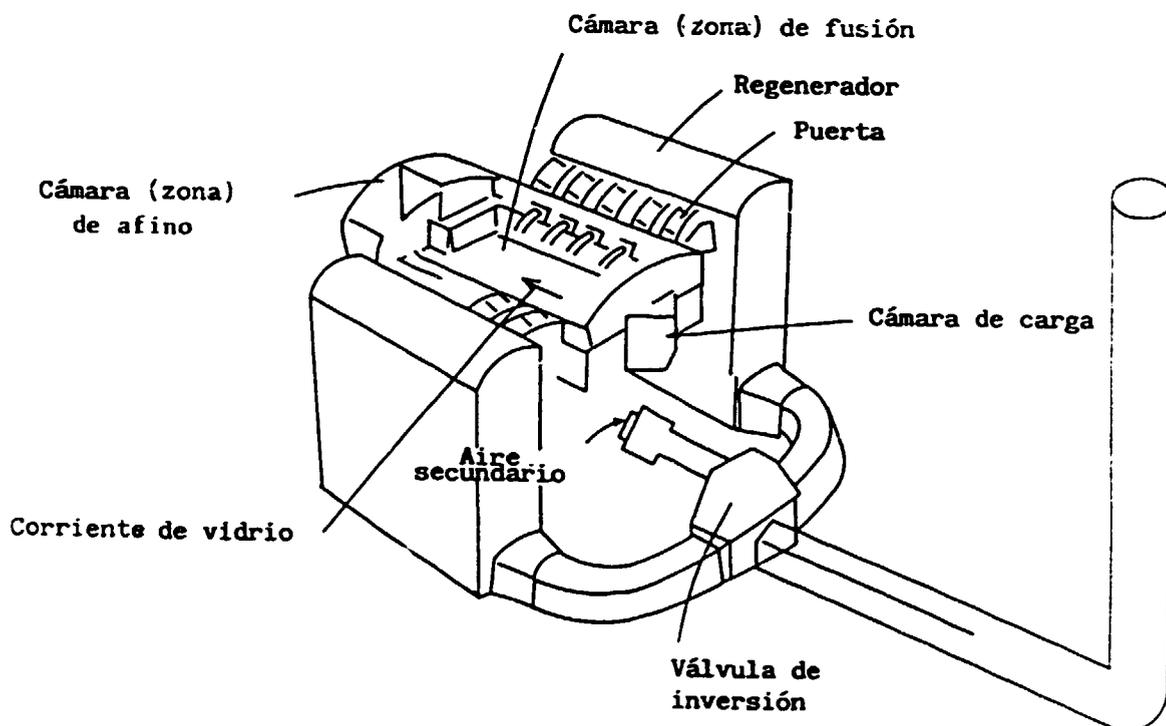


Figura 6 Horno de cámara (tipo de puertas laterales)

La Figura 7 muestra el tipo de horno de puerta terminal. Se trata de un tipo de horno pequeño y mediano con una capacidad diaria de 100 t o menos. En comparación con el de puertas laterales, el horno de puerta terminal presenta una estructura sencilla y un costo de instalación menor, pero resulta difícil aumentar su tamaño. La llama retorna siguiendo la dirección longitudinal del horno y es aspirada en la puerta del lado opuesto a la pared posterior. La distribución de la temperatura dentro del horno varía según la longitud de la llama y es relativamente difícil cambiar dicha distribución.

Ambos tipos de hornos utilizan regeneradores en muchos casos. Algunos de los hornos de tipo pequeño utilizan el recuperador.

Las Figuras 8 a 10 representan los hornos de crisoles para la obtención en pequeña cantidad de múltiples tipos de productos. La Figura 8 ilustra el horno ordinario de crisoles múltiples utilizado desde los primeros tiempos, con 6 a 10 crisoles en el horno circular en los que se funden diferentes tipos de vidrios. La mezcla se carga en el crisol y se funde durante la noche, mientras que el moldeado se realiza

durante el día. La eficiencia no es demasiado buena y no pueden obtenerse vidrios de alta calidad. La mayor parte de las pequeñas y medianas empresas utiliza este tipo de horno.

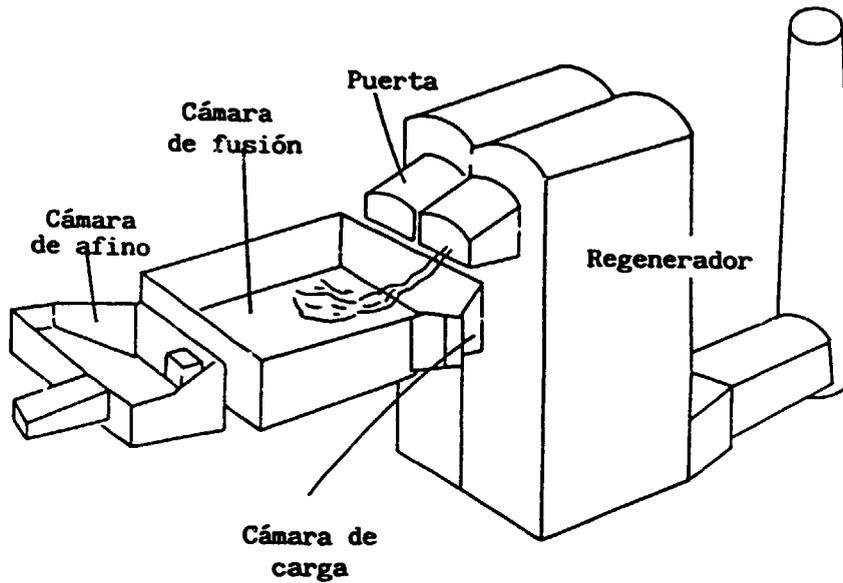


Figura 7 Horno de cámara (tipo de puerta terminal)

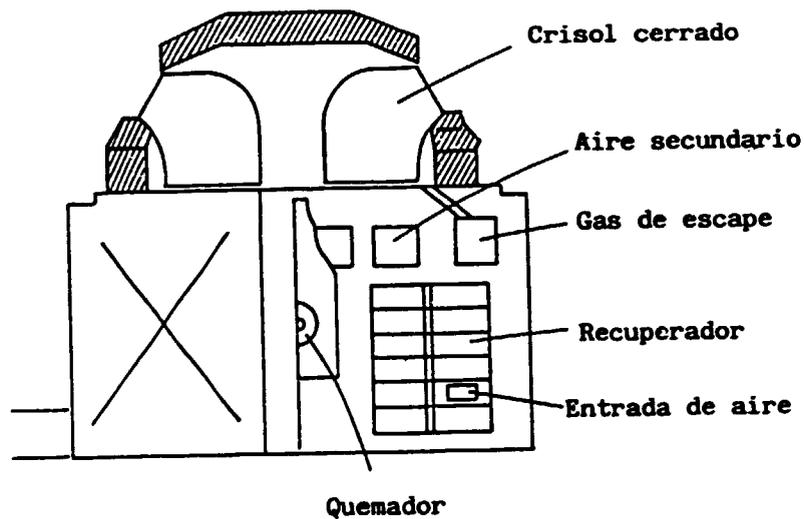


Figura 8 Horno de crisoles

La Figura 9 representa el horno de un único crisol. Es posible emplear no sólo el crisol cerrado sino también el abierto. A pesar de su pequeño tamaño está diseñado para una gran eficiencia. Algunos de estos tipos de hornos tienen un consumo unitario de energía de 4.000 a 5.000 kcal/kg de vidrio.

La Figura 10 representa un horno de crisoles múltiples en el que éstos están instalados en paralelo y no en forma circular. Las empresas pequeñas y medianas también suelen utilizar autómatas y cintas para el transporte. Puesto que el empleo de la forma circular complica bastante la disposición de la fábrica, se ha ideado este tipo de horno para resolver ese problema.

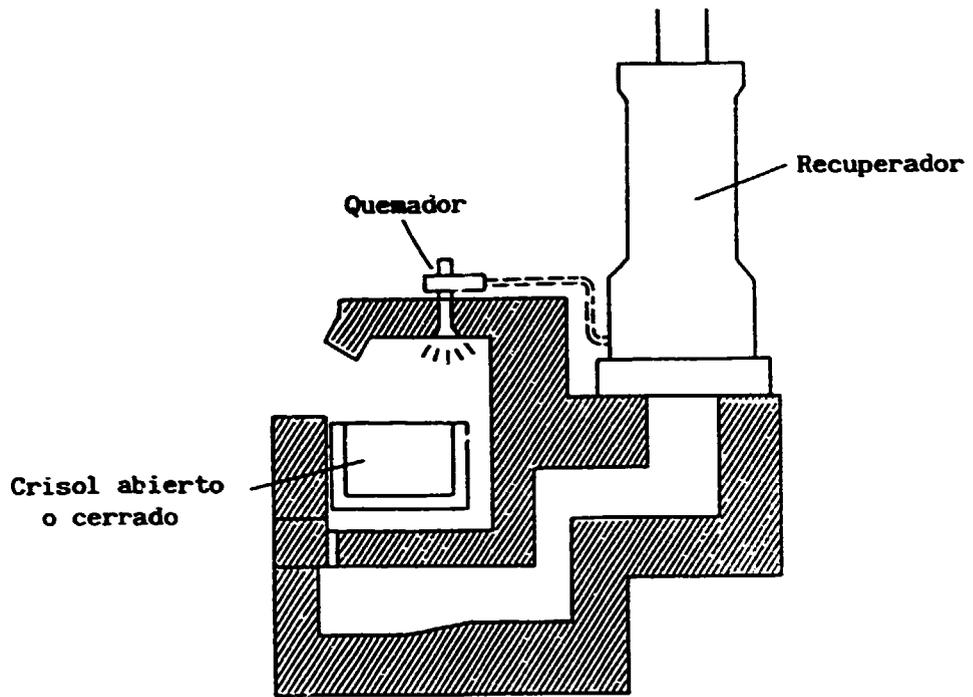


Figura 9 Horno de crisol único (nuevo tipo)

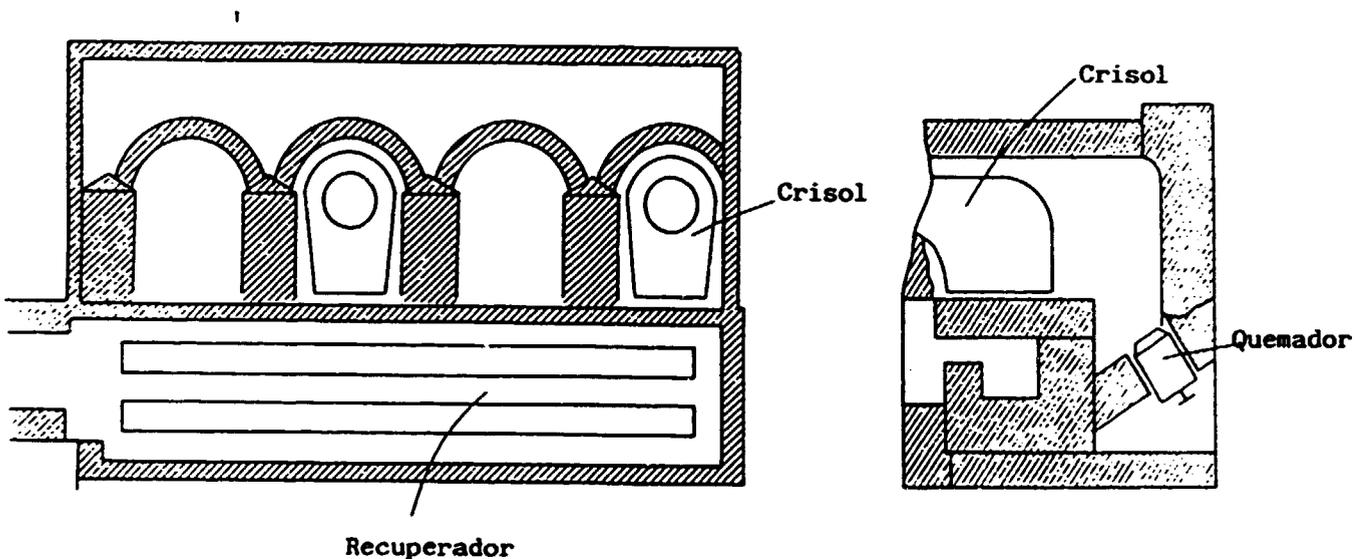


Figura 10 Horno de crisoles múltiples en paralelo

En el horno de crisoles, el recuperador se utiliza exclusivamente como intercambiador de calor.

Puesto que el horno de fusión consume mucha energía, este diseño permite un alto grado de conservación de la energía, que se traduce en un consumo unitario de energía reducido. El consumo unitario varía según la escala. La Figura 11 indica los valores medios anuales en las fábricas de botellas del Japón.

En los 12 años transcurridos de 1975 a 1986, el consumo unitario de energía se redujo en un 26% aproximadamente, de 3.470.000 kcal/t a 2.560.000 kcal/t. Según un informe reciente, algunos de los hornos han reducido el consumo unitario de energía a menos de 2.000.000 kcal/t. En gran parte, esto no se debe sólo a la menor cantidad de combustible utilizado.

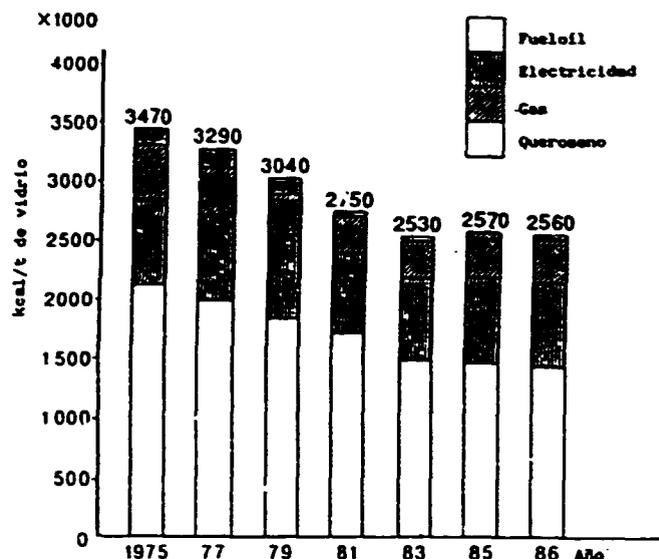


Figura 11 Consumo unitario de energía en la fabricación de botellas de vidrio

La primera medida para la conservación de la energía en el horno de fusión es mejorar la eficiencia de la combustión, intensificar el aislamiento térmico y utilizar eficazmente el gas de escape.

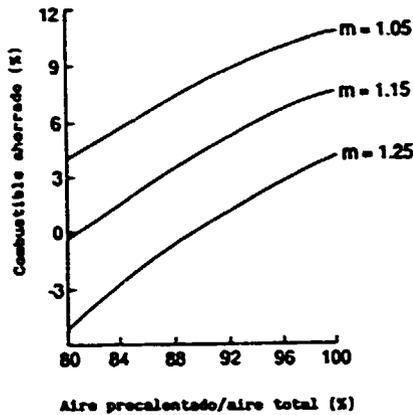
3.1.1 El control de la combustión

El combustible que se emplea en el horno de fusión puede ser líquido (aceite pesado) o gaseoso (GNL, GPL). La eficacia de la combustión puede comprobarse midiendo el CO_2 , el O_2 y el CO contenidos en el gas de escape.

Las materias vítreas utilizadas en el horno de cámara son carbonatos tales como el de sodio (Na_2CO_3) y el de calcio ($CaCO_3$). Estos se descomponen durante la reacción de vitrificación desprendiendo CO_2 . En consecuencia, el resultado del análisis de gases es la suma del CO_2 generado por combustión y el CO_2 generado a partir del material en el horno de cámara, con lo que la cantidad de CO_2 es mayor de lo que sería en el caso de una simple combustión. Cabe señalar que, cuando se considere el control de la combustión, el valor será inapropiado. Es deseable realizar dicho control con el volumen de oxígeno contenido en el gas de escape del horno de cámara.

1) Influencia del aire enfriado distinto del aire secundario precalentado

El aire secundario utilizado para la combustión es precalentado en el intercambiador de calor. El aire primario para la pulverización y el aire que penetra por los espacios libres entre las losas del quemador entran fríos en el horno. La reducción del volumen de este aire frío favorecerá la conservación de energía. La Figura 12 muestra el resultado de calcular la magnitud de la conservación posible de energía reduciendo el volumen de ese aire frío y sustituyéndolo por el aire precalentado. Se obtiene así una representación gráfica basada en el valor $m=1,25$ y un volumen de aire frío equivalente al 10% del aire total. Si el aire frío se reduce en un 1% y el aire precalentado se aumenta en un 1%, la razón de aire disminuye en un 1% y el ahorro de combustible es del 0,5% aproximadamente.



Fuente: Glass Technical School Textbook "Melting" (1989)

Figura 12 Relación entre el aire precalentado y el ahorro de combustible

2) Distribución de la temperatura dentro del horno

Para conseguir una producción estable de vidrio de alta calidad, la distribución de la temperatura debe mantenerse en el nivel óptimo dentro del horno.

Como se indica en la Figura 13, la distribución de la temperatura dentro del horno de cámara está diseñada de modo que la zona caliente se encuentre en la posición central, ligeramente desplazada en la dirección de la garganta. La posición de esta zona caliente varía algo según las condiciones de la carga.

Si la combustión es tal que esa zona se desplaza considerablemente, la corriente de vidrio se verá alterada dentro del horno y aparecerán estrías, ampollas, pequeñas burbujas y defectos análogos, que deterioran la calidad del producto.

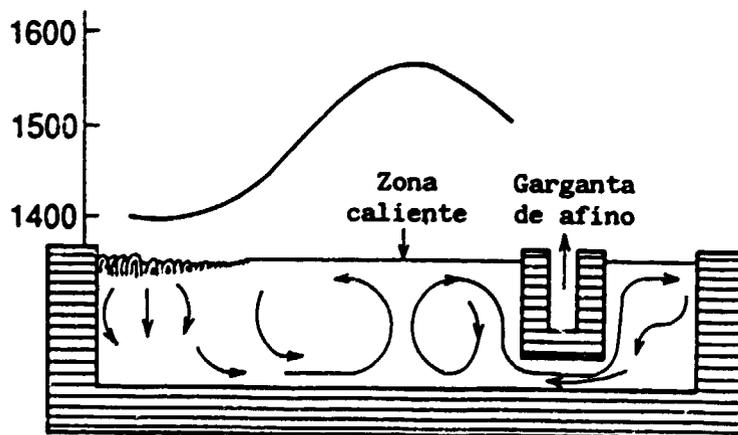


Figura 13 Relación entre la distribución de la temperatura y la corriente de vidrio fundido

Si la distribución de la temperatura dentro del horno se mantiene en el valor óptimo, el borde anterior de la mezcla cargada se moverá de tal modo que ésta será empujada hacia atrás. Si la distribución de la temperatura dentro del horno no es satisfactoria y la contracorriente del vidrio es insuficiente, la carga se desplazará hacia adelante.

En el horno de puertas laterales, la distribución de la temperatura debería optimizarse con relativa facilidad controlando la combustión en cada puerta, pero en la práctica se tropieza con dificultades. Es decir, el ajuste de combustible en cada puerta puede hacerse mediante el quemador, pero no puede controlarse para cada puerta el volumen de aire secundario precalentado. La Figura 14 muestra el volumen de aire suministrado a cada puerta. Como se observa en la figura, la corriente de gas es mayor en la posición más próxima a la chimenea por la que se descarga el gas de escape, y los ladrillos del regenerador se calientan también a mayor temperatura. Por el contrario, la corriente de aire es mayor en la posición más alejada de la chimenea. De este modo circula un gran volumen de aire en la puerta más alejada de la chimenea con gran valor "m" de combustión, mientras que en la puerta más cercana a la chimenea se produce una combustión con pequeño valor de "m". El valor medio se registra como valor de "m" en el análisis del gas dentro del horno. No puede decirse que esto sea satisfactorio ni desde el punto de vista de obtener la distribución óptima de la temperatura ni desde el de la conservación de la energía en la combustión.

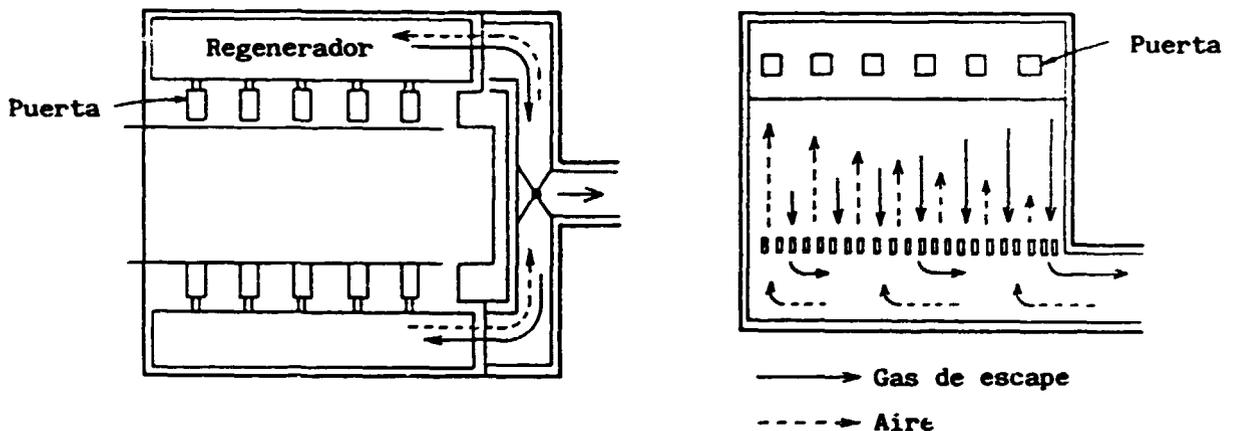


Figura 14 Distribución de la corriente del gas de escape y el aire en el regenerador

Para mejorar esta situación se ha ideado el regenerador de cámara separada, que permite controlar el volumen de aire para cada puerta. Sin embargo, no se utiliza mucho debido a los atascamientos causados por el arrastre y otros problemas.

En el tipo de horno de puerta terminal es más difícil obtener la distribución óptima de la temperatura que en el tipo de puertas laterales. Como se observa en la Figura 15, el quemador en el tipo de horno de puerta terminal está instalado en un extremo de la corriente de vidrio y no hay otro medio de regular la distribución de temperatura que controlando la longitud de la llama.

Si se elige la llama corta, la zona caliente se situará más cerca del quemador, y si se elige la llama larga, dicha zona se desplazará hacia el lado de la garganta.

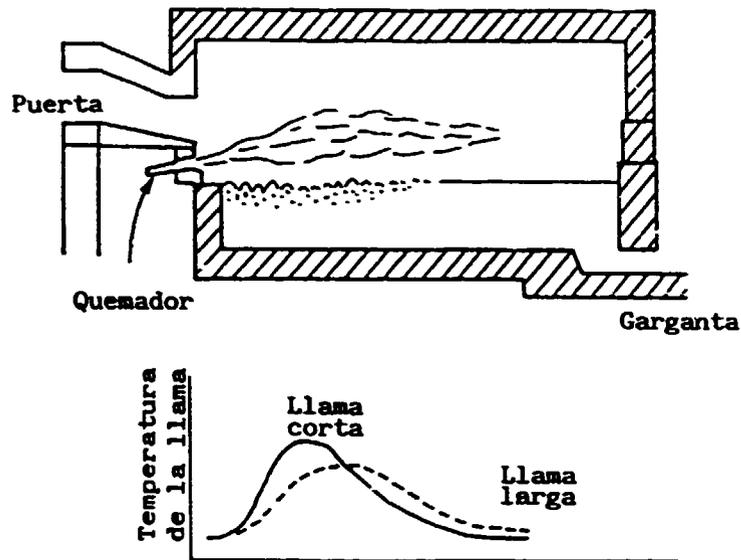


Figura 15 Distribución de la temperatura en función de la llama en el tipo de horno de puerta terminal

La longitud de la llama puede ajustarse como sigue:

- i) cambiando la capacidad del quemador (sustituyendo la boquilla),
- ii) cambiando el tipo de quemador (modificando el volumen de aire primario y el ángulo de rotación de la llama),
- iii) cambiando la presión de atomización del quemador (se obtiene una llama más larga disminuyendo la presión primaria), y
- iv) ajustando el aire secundario.

Sin embargo, estos métodos también tienen efectos limitados, de modo que el tipo de puerta terminal no suele utilizarse en los hornos grandes con una capacidad diaria de 100 a 150 t o más.

3) La combustión en el antehorno

El antehorno tiene la función de controlar la temperatura del vidrio antes de su moldeado e influye directamente en la calidad del producto de vidrio. En la Figura 16 se representa su diseño en esquema.

Las bases del control de la temperatura son:

- i) la optimización de la temperatura de la gota con la que se alimenta la máquina de moldeado, y
- ii) el ajuste de la distribución de la temperatura desde la entrada en el antehorno hasta el alimentador de modo que aquella descienda gradualmente a lo largo de la corriente de vidrio, sin que se produzca ninguna temperatura alta en el trayecto.

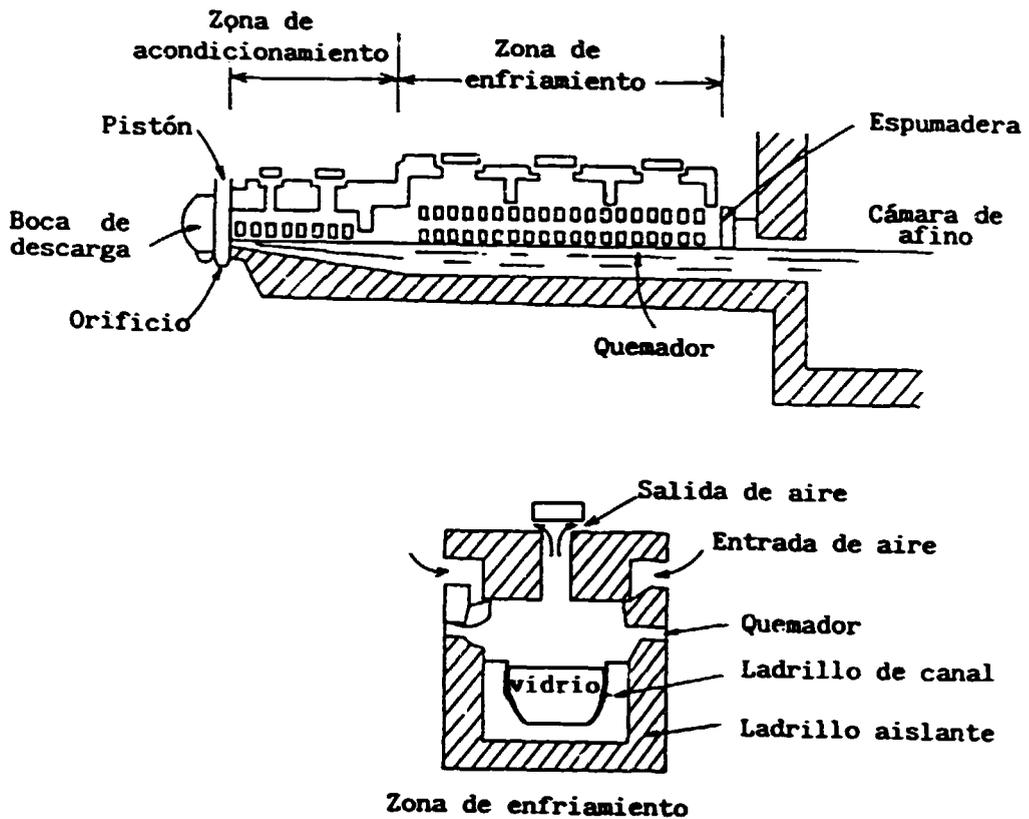


Figura 16 Esquema del antehorno

Con el fin de controlar la temperatura se instala un gran número de pequeños quemadores en la dirección de la corriente. Para este control, la zona de enfriamiento está dividida en tres o cuatro zonas.

Se utiliza como combustible GPL o un gas similar ya que el gas permite una combustión rápida, facilita la producción de llamas cortas y genera poco o nada de carbono. Cuando cae carbono sobre el vidrio, se producen espumas que dan como resultado una coloración.

Cuando el vidrio coloreado se funde, el color puede modificarse por influencia de la atmósfera. A fin de asegurar una coloración estable debe controlarse la atmósfera para conseguir una oxidación o una reducción en el antehorno.

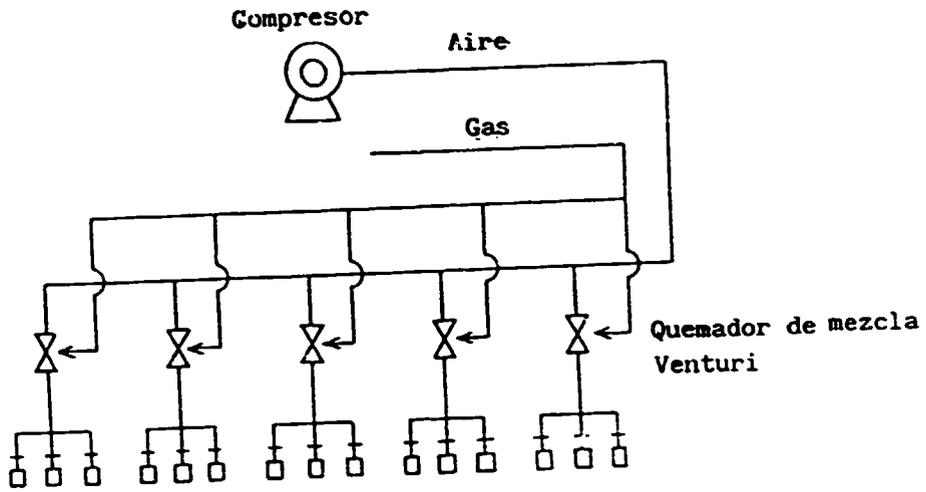
Cuando se va a quemar gas, con frecuencia se mezcla aire previamente con aquél. Esto puede hacerse por los tres métodos indicados en la Figura 17.

La Figura 17 (a) representa un sistema de premezclado que utiliza un mezclador Venturi para gas y aire. Esto permite optimizar la razón de aire total y, si la razón de aire se modifica en cualquier zona, también se ven afectadas las razones de aire en otras zonas. En consecuencia, este sistema no es aplicable al control de la combustión cuando se utilizan muchos quemadores.

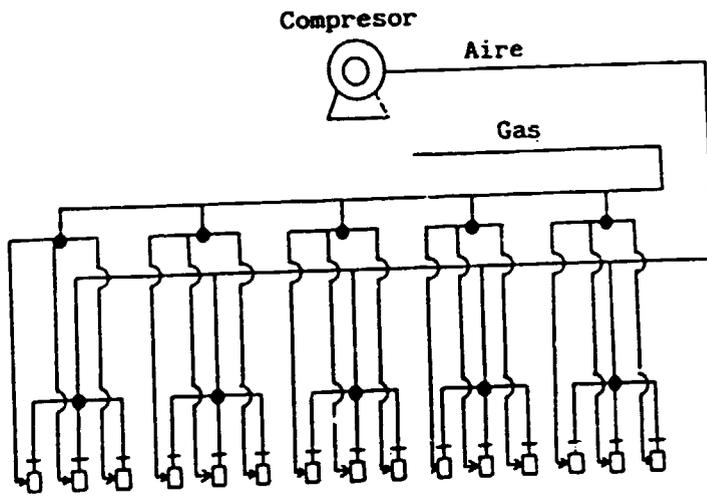
La Figura 17 (b) muestra el método en el que el gas y el aire se mezclan en la boquilla del quemador. Este método está diseñado para aumentar la seguridad impidiendo el retroceso de la llama, pero no consigue eliminar la interferencia entre las zonas de gas y de aire.

La Figura 17 (c) ilustra el método en el que la válvula que mezcla previamente el gas y el aire está situada delante del compresor. Con este sistema, la razón gas-aire es constante por delante del compresor, de modo que también lo es en todas las zonas, incluso cuando el volumen que arde en el quemador es distinto para cada zona. En consecuencia, asegura un control fiable de la razón de aire y, según un informe, permite una conservación importante de energía.

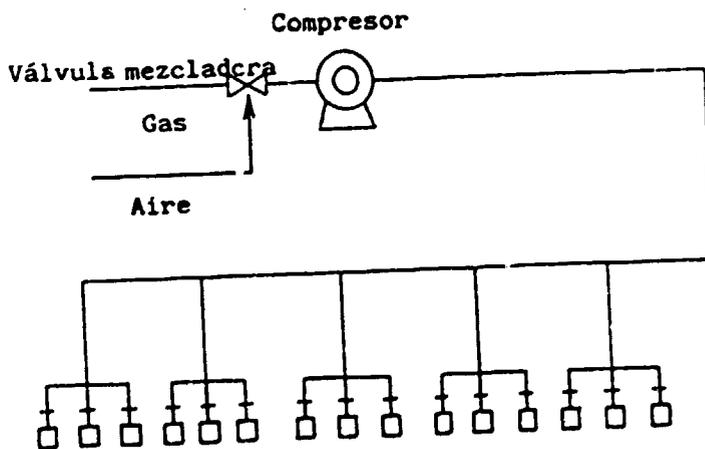
La comparación del oxígeno (O_2) presente en el gas de escape de los tres métodos ha revelado que éste contiene el 8% de oxígeno en el método (a), el 6% en el método (b) y el 1% en el método (c). Con una reducción considerable de la razón de aire se ha logrado reducir el volumen del gas combustible.



(a) Quemador de mezcla Venturi



(b) Quemador de boquilla de mezcla



(c) Quemador de premezcla

Figura 17 Sistemas de quemadores de gas

3.1.2 El aislamiento

Puesto que el horno de fusión tiene una gran superficie, la minimización de la pérdida de calor por la pared de aquél tiene una gran importancia para la conservación de la energía.

Sin embargo, el aislamiento térmico del horno de fusión debe estudiarse cuidadosamente. En caso contrario, se producirá la erosión de los ladrillos utilizados, se reducirá la vida útil del horno y se deteriorará la calidad del vidrio, con los consiguientes y diversos efectos perjudiciales.

1) Aislamiento del suelo de la cámara de fusión

Mejorando el aislamiento en el suelo aumentará la temperatura en el fondo del horno. Esto mejorará la capacidad de fusión del horno y aumentará el rendimiento. Se consigue la ventaja subsidiaria de mejorar la productividad además de la ventaja directa de reducir la pérdida de calor por el fondo. La Figura 18 (a) ilustra un ejemplo de aislamiento. En comparación con el sistema tradicional, sin empleo de ladrillo aislante, la pérdida de calor se ha reducido aproximadamente en un 43%, desde 3.240 hasta 1.382 kcal/m²h.

La cámara de afino también está calorifugada como la cámara de fusión. El aislamiento puede reforzarse a fin de impedir que el vidrio se enfríe.

2) Aislamiento de la bóveda

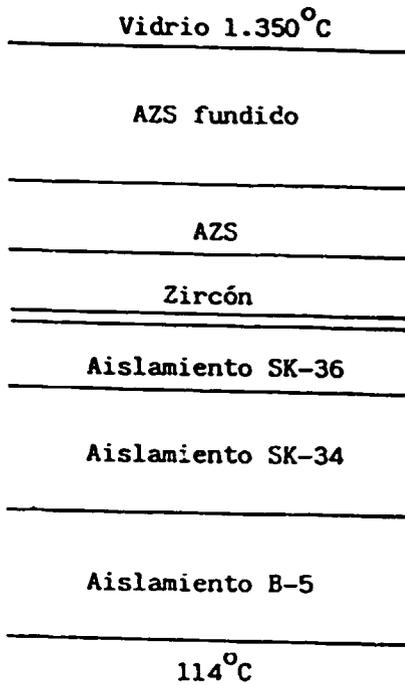
Puesto que se usan ladrillos de sílice para la bóveda, se han desarrollado ladrillos de sílice superrefractarios; se trata de productos de gran pureza que contienen la mínima cantidad de álcali y alúmina, lo que ofrece un mejor aislamiento.

Algunos hornos utilizan material refractario electrofundido del tipo AZS (AZS fundido) para la bóveda. La Figura 18 (c) muestra un ejemplo de aislamiento. AZS significa alúmina-zirconia-sílice.

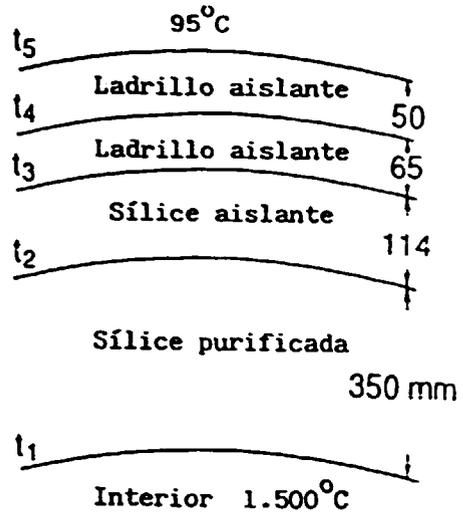
Cuando la temperatura dentro del horno es de 1.500 °C, la temperatura en la pared más externa aislada se reduce a 95 °C y la pérdida de calor es de 810 kcal/m²h. Cuando no se utiliza aislamiento, la temperatura de la pared exterior de la bóveda llega a 300-400 °C.

3) Aislamiento de la pared lateral

Es una tendencia establecida utilizar AZS fundido para el aislamiento del bloque de la cámara de fusión, excepto para el revestimiento metálico. También se aíslan las juntas de ladrillo, pero es necesario un cuidado suficiente. La Figura 18 (c) muestra un ejemplo de aislamiento, en el que se utiliza chapa de fibrocerámica para la pared más externa. Cuando la temperatura media de la pared interna es de 1.350 °C, la de la pared externa es de 141 °C y la pérdida de calor de 2.017 kcal/m²h. La temperatura de la pared externa es de 232 °C y la pérdida de calor de 6.102 kcal/m²h si no se utiliza aislamiento.

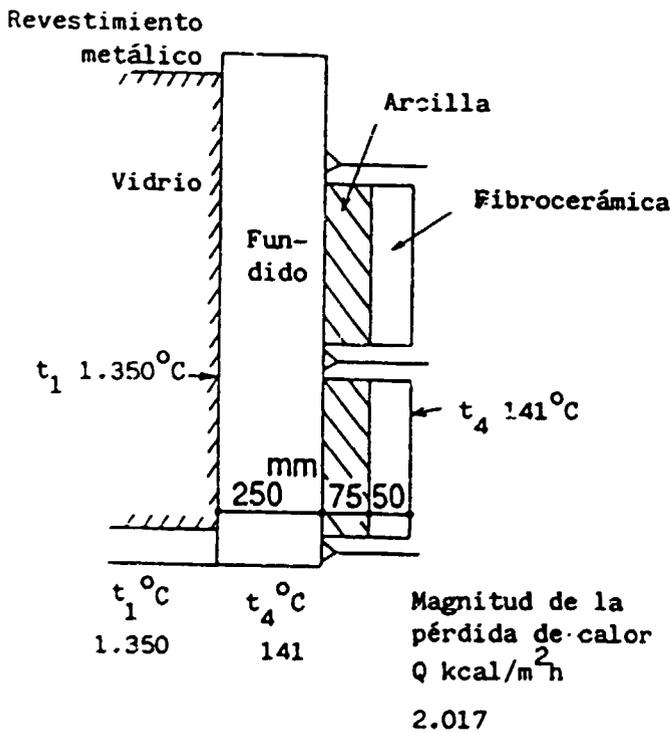


(a) Suelo de la cámara de fusión

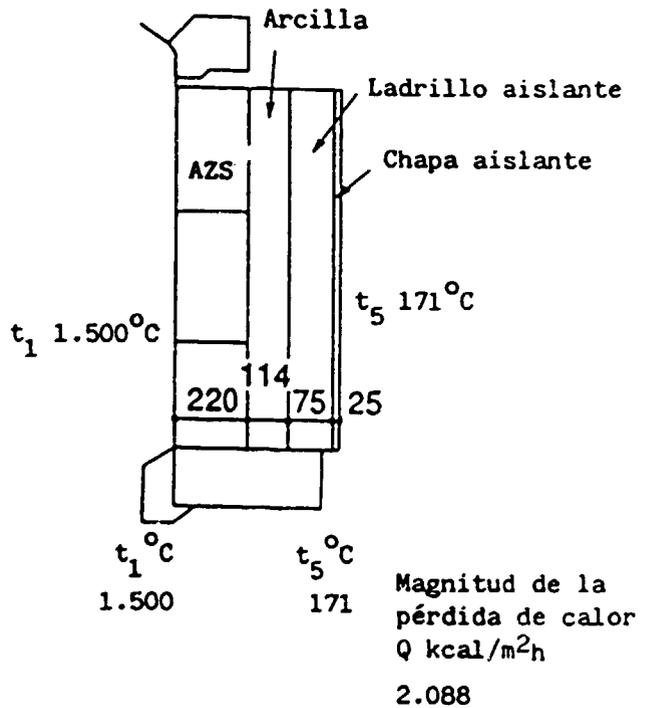


t, °C	Q kcal/m ² h				
1500	1343	1079	769	95	810
1600	1432	1150	820	100	865

(b) Bóveda de la cámara de fusión



(c) Bloque de la cámara de fusión



(d) Pared lateral de la cámara de fusión

Figura 18

En la pared superior, que no está en contacto con el vidrio fundido, se ha llegado a utilizar AZS fundido en lugar del ladrillo de sílice. Al mismo tiempo, se ha mejorado también el aislamiento. La Figura 18 (d) muestra un ejemplo de aislamiento: cuando la temperatura media de la pared interna es de 1.500 °C, la pared externa tiene 171 °C y la pérdida de calor es de 2.088 kcal/m²h. Cuando no se utiliza aislamiento, la temperatura de la pared externa llega a 304 °C y la pérdida de calor asciende a 6.152 kcal/m²h.

3.1.3 La recuperación del calor de los gases de escape

La fusión del vidrio requiere una temperatura de 1.450 a 1.550 °C, de modo que el gas de escape contiene una gran cantidad de calor. La temperatura del gas de escape que penetra en el regenerador desde la cámara de fusión llega hasta 1.450 °C. Por ello, el gas de escape a gran temperatura es recuperado por el regenerador o el recuperador y se utiliza para precalentar el aire secundario para la combustión.

1) Recuperación del calor del gas de escape por el regenerador

El regenerador está diseñado de tal modo que el gas de escape a alta temperatura pasa a través de los ladrillos dispuestos alternativamente en su interior y es absorbido por ellos. Después de la combustión se introduce gas durante cierto tiempo (15 a 30 minutos) y luego aire por conmutación, que absorbe el calor de los ladrillos aumentando de temperatura. Este aire se utiliza para la combustión. El procedimiento se repite a intervalos de 15 a 30 minutos. En consecuencia, hacen falta dos regeneradores por cada horno.

La temperatura del gas de escape es de 1.350-1.450 °C a la entrada del regenerador y desciende a 400-500 °C a la salida. El aire entra en el regenerador a la temperatura ambiente y se calienta hasta 1.200-1.300 °C a la salida. Después se utiliza como aire secundario para la combustión.

2) Recuperación del calor del gas de escape por el recuperador

El gas de escape y el aire atraviesan la pared del recuperador y el calor se intercambia por esa pared. Este método, que se utiliza en los hornos de pequeño o mediano tamaño en los que la cantidad de gas de escape es menor, se distingue por su capacidad para asegurar una temperatura estable de precalentamiento del aire. Sin embargo, la temperatura máxima del aire precalentado no llega a la que se obtiene con un regenerador.

En el tipo de recuperador de ladrillo se produce una fuga de aire a través de la pared hacia el lado del gas de escape. Para comprobar si se ha producido fuga de aire en el recuperador se analiza el gas de escape a fin de examinar la variación del oxígeno. Si ha penetrado aire en el gas de escape debido a fugas, la temperatura del gas disminuirá y el aumento de la cantidad de éste producirá una pérdida mayor de dicho gas. Si penetra aire en el gas de escape a través del conducto de aire secundario, la cantidad de este aire llegará a ser insuficiente en un caso extremo, interrumpiéndose la combustión.

El Cuadro 3 muestra la fuga en el recuperador utilizado con el horno de crisoles.

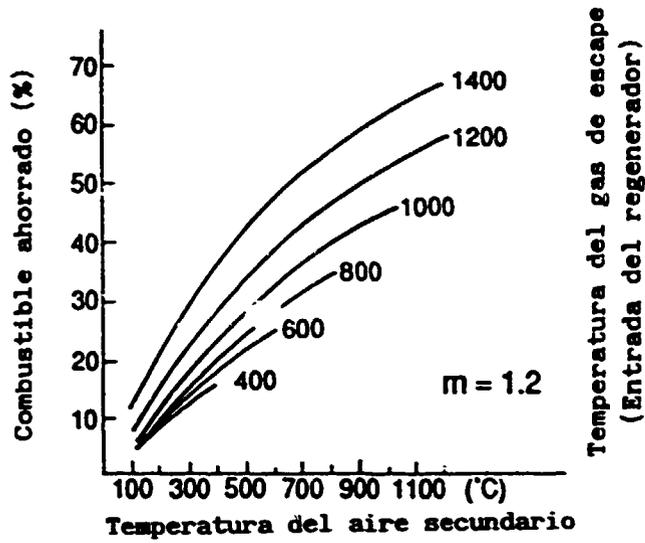
Cuadro 3 Razón de aire en el gas de escape del horno de crisoles con recuperador

	A	B	C	D
Salida del horno O ₂ %	0,2	3,3	1,0	0,6
Razón de aire (m)	1,01	1,17	1,05	1,02
Salida del recuperador O ₂ %	6,2	11,8	5,6	8,9
Razón de aire (m)	1,4	2,2	1,3	1,7

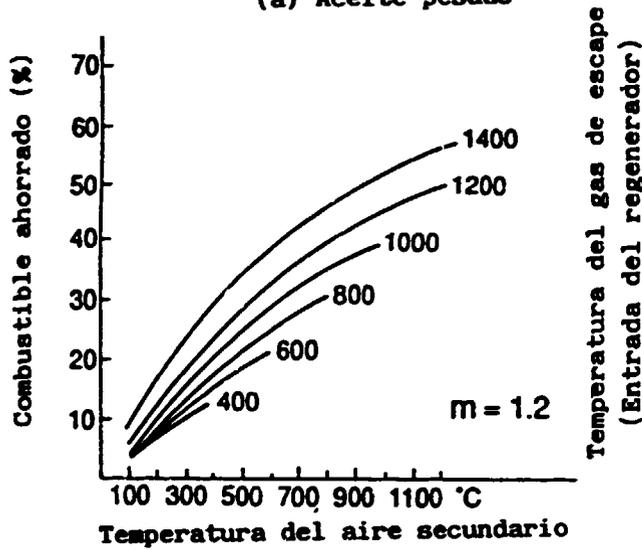
Considerando cuatro hornos, se analizó el contenido de oxígeno (O₂) en el gas de escape dentro del horno y a la salida del recuperador y se comparó la razón de aire (m). El valor "m" era de 1,05 a 1,3 en el horno C, donde la diferencia era mínima, y de 1,17 a 2,2 en el horno B donde la diferencia era máxima, con un incremento de 1,8 veces aproximadamente. Como puede verse, la entrada de aire es inevitable en el recuperador, y esta tendencia es más acentuada a medida que el horno es más viejo. En consecuencia, es esencial una atención diaria.

Las Figuras 19 (a), (b) y (c) muestran la relación entre el porcentaje de conservación de combustible y la temperatura del aire precalentado cuando se utiliza el gas de escape para precalentar el aire secundario. La Figura 19 (a) es un ejemplo en el caso del aceite pesado. Cuando la temperatura a la entrada del regenerador es de 1.200 °C, se ahorrará aproximadamente el 50% del combustible si el aire se precalienta a la temperatura de 900 °C. Si la temperatura del aire se eleva a 600 °C cuando la temperatura del gas de escape es de 800 °C, puede ahorrarse alrededor del 28% del combustible. Según esta figura, el horno con el gas de escape a la temperatura más alta produce el mejor efecto de precalentamiento del aire.

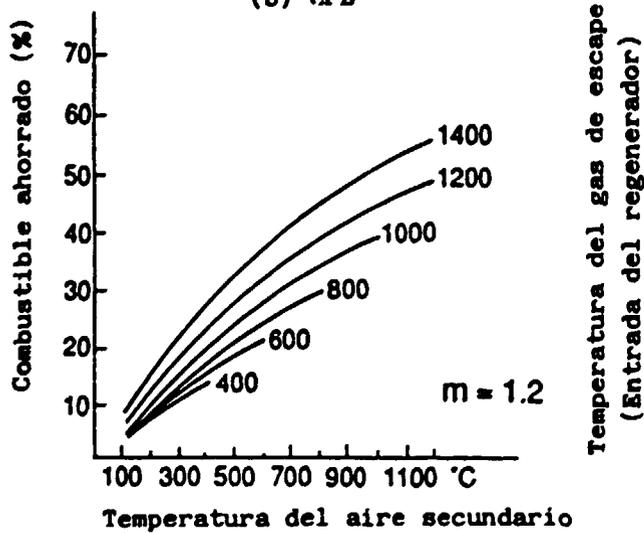
La Figura 19 (b) ilustra la situación con GPL, mientras que la Figura 19 (c) la representa con GNL.



(a) Aceite pesado



(b) CPL



(c) GNL

Figura 19 Ahorros de combustible debidos al aire precalentado

3.2 El horno de recocido

El recocido o temple es un proceso específico de la fabricación del vidrio. Si el vidrio se deja como está después del moldeado se producirán tensiones debido a las diferencias de temperatura en la superficie y en el interior del vidrio, y éste se romperá cuando las tensiones pasen de cierto límite. El recocido tiene por objeto reducir al mínimo la posibilidad de que ocurran tensiones durante el proceso de enfriamiento. Para racionalizar este proceso es esencial tener una correcta información sobre la causa de las tensiones en el vidrio.

Hay dos tipos de hornos de recocido; un tipo de fuego directo en el que el gas de la combustión entra directamente en contacto con el producto y un tipo de mufla en el que el gas y los productos están separados entre sí por un tabique. El tipo de mufla permite el empleo de aceite pesado, menos costoso, pero la eficiencia térmica es baja.

El tipo de fuego directo utiliza gas y electricidad como fuentes de energía y se caracteriza por su gran eficiencia térmica y el fácil control de la temperatura. En consecuencia, el tipo de fuego directo se está usando cada vez con mayor frecuencia.

La Figura 20 muestra un ejemplo de horno de recocido basado en un sistema de convección de circulación forzada. El gas contenido en el horno circula impulsado por el ventilador para conseguir una distribución uniforme de la temperatura, que mejora la eficiencia de la transferencia del calor. Este sistema permite hacer el recocido en un tiempo más corto que con el horno tradicional.

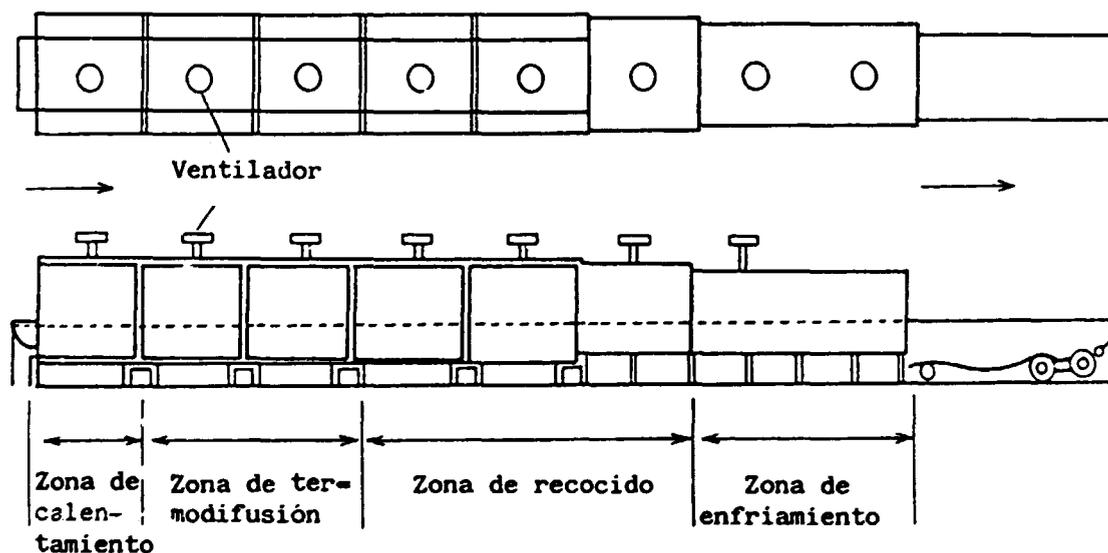


Figura 20 Esquema del horno de recocido

La conservación de la energía en el horno de recocido se realizará teniendo en cuenta lo siguiente:

1) Aislamiento térmico de la pared del horno

Los materiales ordinarios para la pared son principalmente ladrillos refractarios y ladrillos aislantes. Para la pared del horno es eficaz utilizar directamente materiales calorífugos formados por fibras con una capacidad térmica mínima, cuando la temperatura es tan baja como 600 °C, como en el horno de recocido, y la operación puede tener que interrumpirse durante

la noche. Puesto que el horno, al tener una capacidad térmica mínima, puede experimentar una variación de temperatura, debe prestarse suficiente atención al sistema de control. Dado que los productos que se cargan en el horno de recocido tienen una temperatura considerablemente alta, la cantidad de combustible para calentar puede reducirse utilizando un aislamiento suficiente.

2) Impedir que entre aire frío por la abertura de entrada

En el horno de recocido hay poca distancia entre la entrada y la zona de calentamiento, y la zona de termodifusión está muy próxima a la entrada. En consecuencia, la admisión de aire frío por esa abertura tiene una gran influencia; por ejemplo, perturbaría la distribución de la temperatura en el interior del horno. Puesto que la abertura sirve para la introducción de los productos, está diseñada para estar abierta de par en par. Será necesario instalar un regulador de tiro o cortinas aislantes, sin mantenerla abierta. Esta abertura sirve también para liberar el calor de la zona de termodifusión a alta temperatura.

3) Impedir que se abra la abertura de salida

Como la parte interior de la abertura de salida del horno tiene una temperatura más alta, el aire circula hacia dicha parte. El aire que penetra por la abertura perturbará la distribución de la temperatura en el interior del horno, tanto en el sentido vertical como en el horizontal. Es conveniente colocar cubiertas por encima y por debajo de la cinta transportadora para cerrar el espacio cuando sea posible.

4) Reducir el calentamiento de la cinta transportadora

La cinta transportadora, de malla, es de acero ordinario o de acero inoxidable. Cuando penetra en el horno y se calienta, el consumo de calor es considerablemente elevado. Por ejemplo, supongamos lo siguiente:

Peso de los productos a tratar: 630 kg/h
Temperatura de los productos que entran en el horno: 400 °C
Temperatura de termodifusión: 550 °C
Calor específico: 0,252

En consecuencia, el calor necesario para calentar los productos es:

$$Q_1 = 0,252 \times (550 - 440) \times 630 = 23.814 \text{ kcal/h}$$

siendo:

Anchura de la cinta: 1.500 mm
Peso de la cinta: 20 kg/m²
Velocidad de la cinta: 380 mm/min
Temperatura del producto que entra en el horno: 15 °C
Temperatura de termodifusión: 550 °C
Calor específico: 0,132

El calor necesario para el calentamiento de la cinta viene dado por:

$$Q_2 = 0,132 \times (550-15) \times 20 \times 0,38 \times 1,5 \times 60 = 48.304 \text{ kcal/h}$$

Como se ve, el calor necesario para calentar la cinta es más del doble que el que se precisa para calentar el producto. Para ahorrar ese calor, se reduce al mínimo el diámetro del alambre de la cinta y se reduce también su peso haciéndola menos tupida. Sin embargo, este método tiene el inconveniente de disminuir la resistencia. En su retorno la cinta pasa por fuera del horno. Para impedir que la temperatura descienda hasta la del ambiente, en algunas fábricas se hacen mejoras para que la cinta pase por la parte baja del interior del horno, con lo que la cinta penetra ya caliente en la zona de calentamiento.

5) Hacer que la temperatura interior del horno sea uniforme

El interior del horno de recocido está diseñado de modo que tenga una cierta curva de temperatura con respecto a la dirección de la corriente, pero no puede controlarse la distribución de la temperatura en las direcciones vertical y horizontal con respecto a la corriente. Si esta distribución de la temperatura no es uniforme, las tensiones pueden eliminarse de modos diferentes según la posición en la cinta transportadora, con el consiguiente efecto negativo sobre el rendimiento de la producción. Para mejorar la distribución de la temperatura se utiliza el sistema de convección por circulación forzada, como se ilustra en la Figura 20.

6) Temperatura del producto que penetra en el horno

Una vez moldeado, el producto es transportado por la cinta y cargado en el horno de recocido. La temperatura del producto varía según la distancia desde la que es transportado por la cinta. Desde el punto de vista de la conservación de la energía, el producto debería entrar en el horno de recocido tras recorrer la menor distancia posible. Esta depende de la disposición global de los procesos de producción, de modo que su modificación no es muy sencilla. No obstante, siempre que en el futuro se pueda modificar la disposición debería estudiarse la posibilidad de esa mejora.

3.3 El balance térmico (en los hornos de fusión y de recocido)

Medir la temperatura del horno u observar la combustión es el procedimiento habitual para conseguir un funcionamiento estable del horno y obtener productos de alta calidad. El balance térmico es un medio eficaz de promover la conservación de la energía. Se elabora un cuadro del balance térmico para representar numéricamente la situación actual de la pérdida de calor y la eficiencia de funcionamiento del horno.

En las publicaciones especializadas se encontrarán la técnica concreta del balance térmico y la fórmula de cálculo. A continuación se indican los principales puntos de las mediciones en el procedimiento del balance térmico:

1) Entrada de calor

Calor de combustión del combustible: Valor calorífico mínimo del combustible.

Calor sensible del combustible: Puede omitirse cuando el combustible no está precalentado.

Calor sensible del aire para la combustión: Calor del aire precalentado por el regenerador, etc. El caudal se calcula a partir de la superficie de entrada y la velocidad del aire.

Calor sensible de la carga: Se omite excepto cuando está precalentada.

2) Salida de calor

Calor extraído por el vidrio: Es una práctica común incluir el horno de afino en el balance térmico. En este caso la temperatura del vidrio se mide a la entrada del antehorno. La cantidad de vidrio debe ser la extraída de la máquina de moldeo o la cargada en el horno de fusión. En el Cuadro 4 se indica el calor del vidrio.

Cuadro 4 Calor necesario para la producción de varios tipos de vidrio a distintas temperaturas (Valor teórico)

Tipos de vidrio	Temperatura °C	Calor necesario para la fusión kcal/kg de vidrio					
		Adición de chatarra de vidrio (%)					
		0	20	40	60	80	100
Cristal de mesa	1.400	576	543	510	477	444	411
	1.250	530	497	464	431	398	365
Vidrio laminado	1.400	666	615	563	512	460	409
	1.150	571	520	468	417	365	314
Vidrio de borosilicato	1.400	508	482	455	429	402	376
	1.300	477	451	424	398	371	345
Vidrio (cristal) de plomo	1.400	496	472	448	424	400	376
	1.100	391	367	343	319	295	271

Fuente: Glass Engineering Handbook (1966).

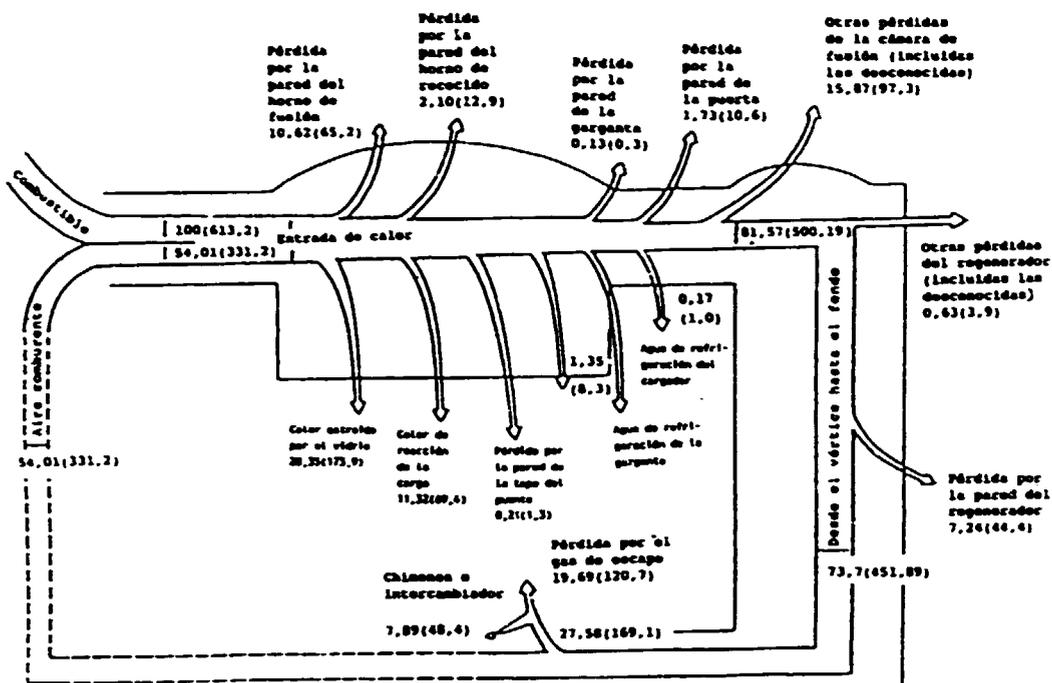
Pérdida de calor por la pared del horno: La pérdida de calor por la bóveda, la pared lateral, el fondo, etc. se determina con el medidor de flujo calórico. Hay que medir uno o más puntos por cada 5 m². Si no se dispone de medidor de flujo calórico se utilizará un termómetro de superficie para medir la temperatura de la superficie y obtener el resultado por cálculo. Debe señalarse que el cálculo presupone que el flujo de aire cerca de la pared del horno es una convección natural.

Calor latente de vaporización de la humedad del baño: Para medirla se toma una muestra de la tolva situada en la parte anterior del horno.

Cuando el cargador de mezcla y la garganta están refrigerados, hay que añadirlos a la cantidad de calor perdido.

Además, si se usa un calentador eléctrico como medio auxiliar de calefacción es necesario añadir su entrada y su salida de calor.

En la Figura 21 se representa un ejemplo de diagrama de balance térmico de la cámara de fusión de vidrio.



Fuente: Guidance of Energy Conservation (1983). The Glass Manufacturing Industry.

Figura 21 Diagrama de balance térmico de la cámara de fusión de vidrio

Los Cuadros 5 a 8 muestran ejemplos del balance térmico del horno de fusión, el antehorno y el horno de recocido. El Cuadro 5 indica el balance térmico de tres hornos correspondientes a épocas distintas. Se observan los buenos resultados obtenidos con el progreso de los esfuerzos de conservación de la energía. Los Cuadros 6 y 7 muestran el balance térmico del antehorno. Las posiciones para medir la temperatura se indican en la Figura 22.

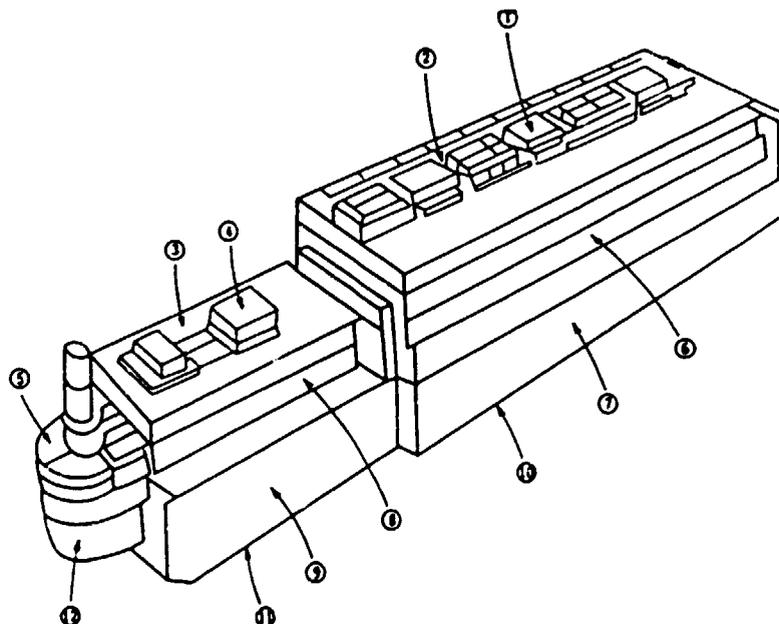


Figura 22 Posiciones para medir las pérdidas de calor en el antehorno

Cuadro 5 Balance térmico de tres generaciones de hornos

		A	B	C
		Después de 1972		
Producción	(t/día)	266,00	121,00	264,00
	(fx ²)	4,25	5,58	5,53
	(1.000 kcal/t)	1.323,00	1.215,00	1.107,00
Pérdida de calor	(kcal/m ² h)	1.666,10	1.223,20	675,50
	x 1.000 kcal/t.d	256,00	268,00	135,00
Eficiencia térmica %		34,10	39,70	44,00
Calor extraído por el vidrio (%)		27,40	28,40	31,40
Calor del reactor por baño (%)		67,00	11,30	12,60
Chatarra de vidrio (%)		(38,00)	(23,00)	(15,00)

		A	B	C
Entrada de calor	Combustible	100	100	100
	Aire secundario	50,7	54,0	56,6
Salida de calor (%)	Pared del horno de fusión	12,0	10,82	5,80
	Pared del horno de afino	2,0	2,10	0,80
	Pared de la puerta	1,7	1,70	1,40
	Pared de la garganta	0,1	0,13	0,10
	Humedad del baño	2,3	1,35	2,50
	Agua de refrigeración de la garganta	0,2	0,57	0,33
	Agua de refrigeración del cargador	0,2	0,17	0
	Otras pérdidas	21,1	15,9	27,0
	Calor extraído por el vidrio	27,4	28,4	31,4
	Calor del reactor por baño	6,7	11,3	12,6
		34,1	40,0	44,0
	Total	73,7	72,4	81,9
	Pared del regenerador	3,6	7,20	3,7
	Otras pérdidas	5,4	0,63	0,5
	Total	9,0	7,9	4,2
Gas de escape	17,3	19,7	13,9	

Fuente: New Glass Tech Vol. 3 (1983): No.4.

Cuadro 6 Pérdidas de calor en el antehorno

	A	B	A x B	Pérdida total	Pérdida parcial/	Pérdida de
	Superficie	Pérdida media de calor	kcal/h	de calor	pérdida total	calor/ superficie
	m ²	kcal/m ² h		kcal/d	%	kcal/m ² h
Bóveda	1	0,56	5.600	372.000	37,3	1.526
	2	7,30	3.788			
	3	1,80	1.593			
	4	0,11	990			
	5	0,39	3.530			
Pared lateral	6	1.206	9.017	411.000	41,2	959
	7	751	5.886			
	8	1.290	1.290			
	9	490	931			
Suelo	10	695	5.860	214.000	21,4	768
	11	387	793			
	12	2.030	2.253			
Total	39,97		41.531			

Fuente: New Glass Tech Vol.3 (1983). No.4.

Cuadro 7 Balance térmico del antehorno

		x 10 ⁴ kcal/d	%	Siendo 100% el calor aportado por el vidrio
Entrada	Calor aportado por el vidrio	2.184,5	83,0	100
	Calor de combustión	448,8	17,0	20,5
		2.633,3	100	120,5
Salida	Calor extraído por el vidrio	2.104,6	79,9	96,3
	Calor perdido por la pared	99,7	3,8	4,6
	Gas de escape y otras pérdidas	42,9	16,3	19,6
		2.633,3	100	120,5

Fuente: New Glass Tech Vol.3 (1983). No.4.

El Cuadro 8 presenta un ejemplo del balance térmico del horno de recocido. La característica de este caso es que las otras pérdidas de calor son mayores. Al parecer está incluida la cantidad de calor necesaria para calentar la cinta transportadora.

Cuadro 8 Balance térmico del horno de recocido

Entrada de calor			Salida de calor		
	kcal/kg	%		kcal/kg	%
Combustible	450	79,5	Pared lateral	27,4	4,8
Calor aportado por el vidrio	116,3	20,5	Espacio abierto	139,1	24,5
			Gas de escape	134,0	23,7
			Extraído por el vidrio	14,0	2,5
			Otras pérdidas	251,8	44,5
Total	566,3	100		566,3	100

Fuente: Guidance of Energy Conservation (1983). The Glass Manufacturing Industry.

3.4 Otras medidas

1) Uso de un calentador eléctrico

Para aumentar la producción sin cambiar el tamaño del horno se suministra corriente alterna (CA) a la cámara de fusión. Este método se utiliza con frecuencia en los hornos de fabricación de botellas. Puesto que esta electricidad se utiliza para la fusión del vidrio con una eficiencia próxima al 100%, este método es muy eficaz.

Se considera que la electricidad necesaria para aumentar el producto en una tonelada es de 22 a 28 kW. Suponiendo que sea de 28 kW, el aporte de 24.080 kcal es suficiente, pues 1 kW corresponde a 860 kcal. El empleo de un calentador para aumentar la producción reducirá el consumo específico de energía.

2) Burbujeo

Se introduce aire por el fondo de la cámara de fusión y el vidrio es agitado por las burbujas, lo que acelera la homogeneización y mejora la calidad del producto. El burbujeo aumenta la temperatura en el fondo de la cámara de fusión con el consiguiente aumento de la temperatura del horno. En consecuencia, este método contribuye directamente a la conservación de la energía. Además, la mejora de la calidad del producto reduce la cantidad de material defectuoso y disminuye el consumo específico de energía.

Método del burbujeo

Se instalan varias boquillas (10 o más), perpendiculares a la corriente del vidrio, en el fondo cerca de la zona caliente de la cámara de fusión, y se inyectan de 1 a 10 litros de aire por hora en el vidrio fundido.

3) Calentamiento eléctrico del antehorno

Es bien sabido que el calentamiento directo del antehorno con electricidad ahorra una cantidad considerable de energía. En el caso del vidrio de borosilicato, todo el antehorno está encerrado

sin superficie de contacto entre el aire y el vidrio, con lo que se consigue un vidrio de alta calidad. Sin embargo, como este método no se usa con frecuencia sus ventajas o desventajas no están tan claras actualmente.

4) Uso de chatarra de vidrio

La Figura 23 muestra que el uso de gran cantidad de chatarra de vidrio ahorra energía. Cuando no se añade nada de chatarra de vidrio, en un horno con una capacidad de producción diaria de 150 toneladas se usan 200 kg de combustible/kg de vidrio. En cambio, cuando se añade un 50% de chatarra de vidrio, el consumo de combustible se reduce a unos 180 kg/kg de vidrio.

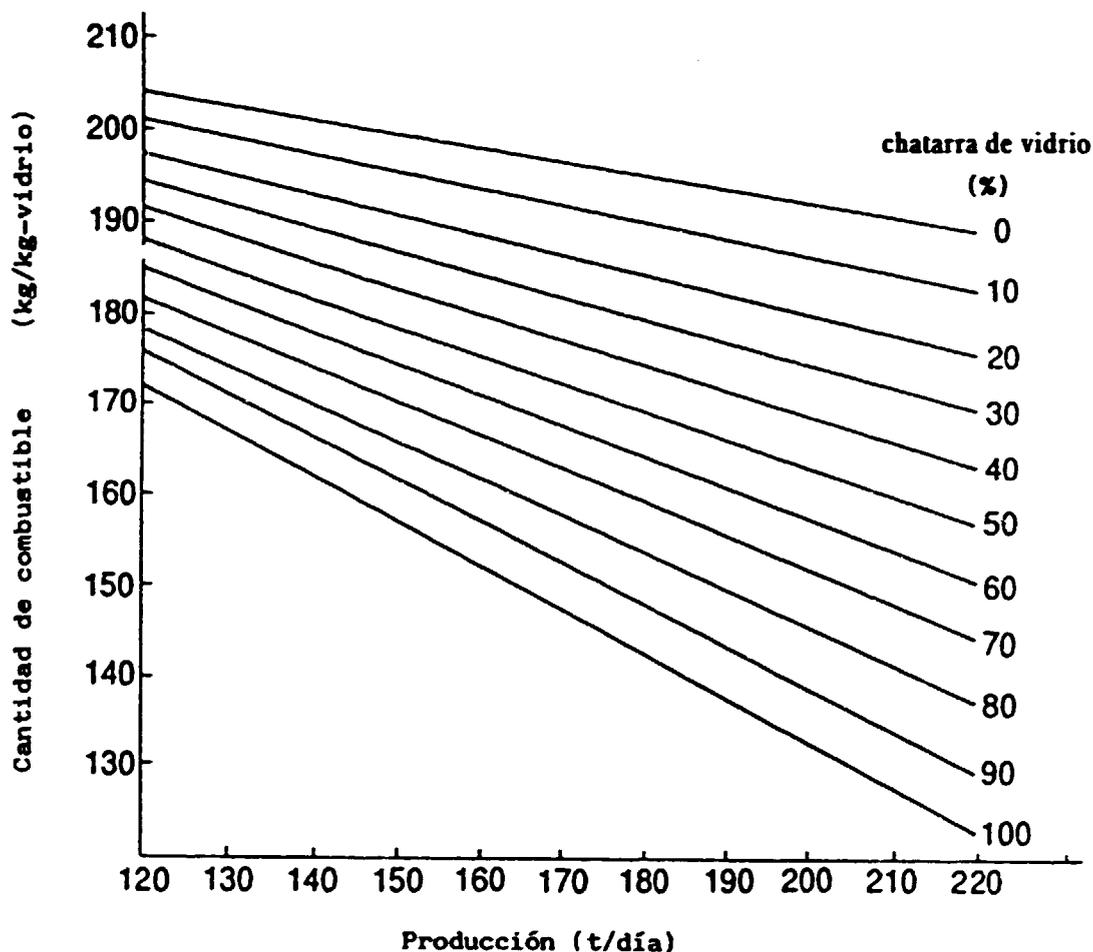


Figura 23 Relación entre la producción y la cantidad de combustible para distintos contenidos de chatarra de vidrio

El empleo únicamente de chatarra de vidrio producida en la fábrica puede ser satisfactorio. Sin embargo, la generación de tal cantidad de chatarra de vidrio indica una tasa alta de producción defectuosa, lo que no es deseable. La chatarra de vidrio existente en el mercado está mezclada inevitablemente con sustancias extrañas y resulta costoso mantener la calidad. Si puede conseguirse chatarra de vidrio de alta calidad, su empleo en gran cantidad contribuirá a la conservación de energía.

5) Preparación de una mezcla de baja temperatura de fusión

Se han hecho varios estudios sobre mezclas para reducir la temperatura de fusión sin deteriorar la calidad del vidrio. El método considerado más eficaz es añadir litio. Como fuentes de litio se emplean carbonato de litio (Li_2CO_3) o espodumena (Li_2O , Al_2O_3 , 4SiO_2). La espodumena se compone de 5% de Li_2O , 18,7% de Al_2O_3 , 74,7% de SiO_2 y 0,1% de Fe_2O_3 , pero su composición debe comprobarse antes de emplearla.

La adición de una pequeña cantidad de litio reduce la viscosidad del vidrio a alta temperatura y disminuye la temperatura de ruptura de la espuma. Tomando un ejemplo de vidrio (compuesto de Na_2O - CaO - SiO_2), la Figura 24 muestra que la temperatura a la que $\log \eta = 2,0$ era de 1.400 °C cuando se utilizaba el 0% de Li_2O . Si se utilizaba el 0,2% de Li_2O esa temperatura disminuía en 30 °C y cuando se empleaba el 1,9% de Li_2O la temperatura se reducía en 60 °C hasta 1.340 °C. En consecuencia, la adición de una pequeña cantidad de litio reduce la viscosidad. Esto se ha demostrado por la disminución del tiempo de ruptura de las burbujas en los hornos comerciales. Sin embargo, el material de litio es costoso. Por lo tanto se hará un estudio para llegar a una transacción entre la conservación de la energía y el costo del material.

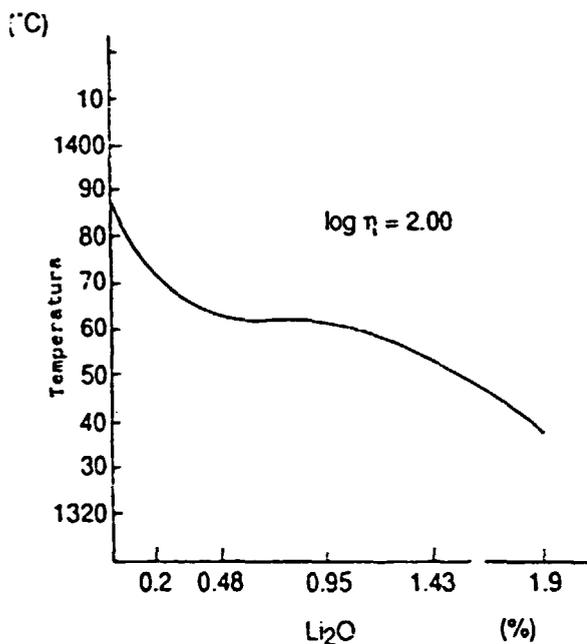


Figura 24 Viscosidad frente a contenido de Li_2O

- 6) Además, en el caso de un horno pequeño con una capacidad de producción diaria de 10 t o menos, debe estudiarse la transformación en un horno completamente eléctrico, la adición de oxígeno para la combustión en el quemador y la introducción de gas en el atomizador primario de aire, aunque estos procedimientos no se describirán en el presente documento.