

## 9.- EL MODELO "NOUFORN 55"

### 9.1.- GENERALIDADES

A partir de las consideraciones realizadas en los Capítulos anteriores, vamos a tratar de construir un modelo que represente, de manera sencilla y manejable, el comportamiento de un horno continuo, de balsa, que elabora vidrio. Con la ayuda de un PC, este modelo deberá proporcionar información suficiente para explicar los diferentes fenómenos observados –tanto cualitativa como cuantitativamente–, diseñar nuevos hornos según los criterios que el utilizador presente para la optimización de los resultados que desea obtener, o mejorar el funcionamiento de hornos ya existentes. Incluso –y este ha sido el objetivo fundamental de este estudio– diseñar sistemas para la regulación automática de su funcionamiento, dotándolo de nuevos equipos de medida, adecuados a esta automatización.

### 9.2.- ESTRUCTURA DEL MODELO

Se parte de un conjunto de datos necesarios para iniciar el funcionamiento del modelo. Esto datos son:

- 1).Naturaleza de las materias primas (composición química, fundamentalmente)
- 2).Composición de la mezcla vitrificable
- 3).Proporción de calcín
- 4).Producción deseada del horno
- 5).Longitud interior de la cuba
- 6).Anchura interior de la cuba
- 7).Anchura de la cuba
- 8).Profundidad del vidrio
- 9).Altura de la superestructura
- 10).Distribución de temperaturas en el "radiador"
- 11).Naturaleza del combustible
- 12).Naturaleza del comburente
- 13).Exceso de aire de combustión
- 14).Estructura de las cámaras de recuperación
- 15).Temperatura ambiente

### 1ª Fase de los cálculos

El modelo utiliza, en primer lugar, dos subrutinas simultáneamente:

Subrutina a)

A partir de los datos 1) 2) y 3), determina la composición del vidrio a obtener así como sus propiedades físicas y termoquímicas.

Subrutina b)

A partir de los datos 11) 12) y 13), determina la composición de los humos que se obtendrán, así como sus propiedades físicas.

### 2ª Fase de los cálculos

Luego, a partir de los datos 7) a 13) (y las propiedades del vidrio y de la combustión), determina las velocidades medias de las corrientes de convección del vidrio en la cuba, dando un mapa de las temperaturas alcanzadas, tanto en la cuba como en la superestructura del horno. Al propio tiempo, realiza una estimación del grado de afinado del vidrio obtenido. Si este grado de afinado no es el esperado, el operador deberá cambiar alguno de los datos de entrada (generalmente las temperaturas del radiador, la producción del horno o la tasa de calcín). En algunos casos el modelo pone de manifiesto la necesidad de añadir ciertos complementos al horno en estudio (cambio de su geometría, uso de barboteadores, electrodos fuente, etc.).

Al propio tiempo, gracias al conocimiento de la estructura de las cámaras de recuperación, y los datos de combustión, calcula el consumo de combustible y comburente, el volumen de humos producido y sus temperaturas en los diferentes puntos de su recorrido, lo que facilita el cálculo posterior del sistema de tiro de la combustión.

### 3ª Fase de los cálculos

A partir de esta información, el operador puede realizar otras simulaciones destinadas a optimizar los resultados, en función de los criterios se le fijen previamente (económicos, técnicos, de condiciones medioambientales, etc.).

## 9.2.- CONSIDERACIONES PRELIMINARES AL MODELO

Del universo que nos rodea, sólo podemos observar una parte. Y no podemos saber la importancia de esta parte respecto de la totalidad, puesto que por esta misma razón, no podemos saber cómo es la totalidad del Universo.

En la parte observable de este universo que nos rodea, apreciamos unas evoluciones que, a nuestro parecer, siguen unas *leyes* –llamadas *leyes físicas*– que, en algunos casos, hemos sido capaces de establecer de manera parcial.

Cuando partiendo de unas condiciones determinadas (supuestamente conocidas), deseamos predecir los resultados de un fenómeno observable, y aplicamos un conjunto de algoritmos que intentan representar la parte más importante del fenómeno, debemos ser conscientes de que estamos obviando otro conjunto, desconocido, al que atribuimos de manera gratuita, una importancia menor. No obstante, estas otras leyes o algoritmos –o ecuaciones– están ahí, y los fenómenos observados como resultado experimental difieren de los predichos tanto más, cuanto mayor es la importancia de leyes o algoritmos no tenidos en cuenta.

Al conjunto de algoritmos conocidos que intentan representar un fenómeno dado, le vamos a llamar *El Modelo* del fenómeno. Un *Modelo* es *tanto mejor*, cuanto menores son las diferencias entre los resultados esperados y los observados experimentalmente, es decir, cuanto menor es la influencia de las leyes, algoritmos o ecuaciones "olvidados" en el conjunto universal del fenómeno.

Dice *Henri Poincaré* en alguno de sus artículos:

*«... ¿Podemos hablar de leyes al azar? ¿No es el azar la antítesis de toda ley? La probabilidad se opone a la certeza; es pues lo que se ignora y, por lo tanto, lo que no podría calcularse. El azar existe para nosotros a causa de nuestra debilidad y de nuestra ignorancia; e incluso sin salir de nuestra debilidad humana, lo que es azar para el ignorante no lo es para el sabio. El azar no es más que la medida de nuestra ignorancia. Los fenómenos fortuitos son, por definición, aquellos cuyas leyes ignoramos ...»*

Con el fin de que el modelo que buscamos, pueda reproducir lo mejor posible un fenómeno dado, hemos recurrido a dos etapas en su construcción: primero hemos establecido unos algoritmos que creemos que mejor lo representan, en los que se introducen un conjunto de coeficientes, de valores desconocidos "a priori"; luego, mediante una serie de observaciones experimentales, y recurriendo a diferentes metodologías, asignamos a esos coeficientes unos valores "más probables" –tomado este término de probabilidad en el sentido que *H. Poincaré* le da–. De esta forma, y dentro de los límites en que se han observado los valores experimentales, el modelo queda "calibrado", así como estimado su grado de validez.

### 9.3.- LOS VALORES EXPERIMENTALES

En el caso que nos ocupa, los valores que tomaremos como experimentales, han sido extraídos desde la observación de hornos para la elaboración de vidrio, en funcionamiento totalmente industrial. Estos hornos cubren una gama bastante amplia, tanto en cuanto a tamaño se refiere, colores de vidrio y formas de funcionamiento. No así en tipos de vidrio, ya que todos ellos elaboran vidrios silico-sodo-cálcicos exclusivamente. En el cuadro resumen adjunto se recogen las principales características de estos hornos.

Se consideran datos, es decir, valores que son tomados como entradas ("inputs") en el modelo a partir de su medición directa en cada horno, y en cada caso, a los siguientes:

- Composición química y proporciones relativas, de las materias primas que forman la mezcla vitrificable.
- Composición química del vidrio resultante (Capítulo I, §3).
- Propiedades físicas y termoquímicas de estas materias y del vidrio resultante. (Capítulo I, §1 a 3; Capítulo VI).
- Caudal de vidrio extraído del horno.
- Propiedades (composición, poder calorífico, etc.) de cada uno de los combustibles utilizados (Capítulo IV).
- Propiedades del comburente (aire ambiente en todos los casos, cuya composición tipo –ver Capítulo IV, §3– es modificada en cada caso en función de la humedad media constatada).
- Caudales de combustible y comburente.
- Composición, caudal y propiedades de los humos resultantes (medición directa, en todos los casos, de exceso de  $O_2$  en los humos; Capítulo IV, § 1 y 2).
- Geometría del horno y de los sistemas de recuperación del calor sensible de los humos (Capítulo VIII).
- Pérdidas térmicas por todas las paredes del sistema (Capítulo IV, §3).
- Distribución de las temperaturas en el elemento radiador (Capítulo III, §4).

Se consideran también datos, para todo horno y en todas las condiciones estudiadas, ciertos valores obtenidos de la literatura especializada, de la que extraemos la experiencia obtenida de los estudios realizados por otros autores en este mismo campo.

Es importante mencionar los siguientes:

- Emisividad, como cuerpos grises, de los refractarios que forman la superestructura del horno,  $e_r$ .
- Emisividad, como cuerpo gris, de la mezcla vitrificable flotando sobre el vidrio de la cuba,  $e_c$ .
- Emisividad, como cuerpo gris, del vidrio de la superficie libre del vidrio en la cuba,  $e_v$ .

Los valores medios atribuidos a cada uno de estos datos son los siguientes:

$$e_r = 0,8$$

Este valor es aceptado por todos los autores, si bien oscila según el grado de vitrificación de las paredes radiantes, y la emisividad de los humos que se

interponen entre estas superficies y los sumideros de energía. Se admiten variaciones de  $\pm 0,05$ . Más adelante veremos la sensibilidad del modelo respecto a este valor.

$$e_c = 0,9$$

En este caso, todos los autores están de acuerdo en atribuirle un valor elevado a esta emisividad, debido fundamentalmente a la naturaleza pulvulenta (en los primeros momentos, al menos), de la mezcla vitrificable. Su variabilidad proviene del *fritado*, previo a la fusión, que sufre la superficie de esta mezcla. Se le supone una variabilidad inferior a  $\pm 0,03$ , que sólo afectaría a la segunda cifra decimal, que no consideramos.

$$e_c = 0,85$$

La absorción (y emisividad) del vidrio a la radiación de cuerpos situados entre los  $1.400\text{ }^{\circ}\text{C}$  y los  $1.600\text{ }^{\circ}\text{C}$  es muy alta –longitudes de onda dominantes  $1,73\text{ m}$  y  $1,55\text{ m}$  respectivamente (Anexo I, §1)– debido a la opacidad casi total del vidrio a radiaciones de longitud de onda superiores a las  $2,75\text{ m}$ . Sin embargo, debe tenerse en cuenta que la superficie del baño de vidrio a estas temperaturas es un perfecto espejo. La parte de la radiación reflejada depende de:

- El ángulo de incidencia, que varía desde  $0^{\circ}$  a  $90^{\circ}$ , respecto a la normal a la superficie.
- El ángulo de polarización del rayo incidente; en nuestro caso deberemos suponer que la radiación electromagnética incidente tiene un ángulo de polarización que se distribuye uniformemente entre  $0^{\circ}$  y  $180^{\circ}$ .
- El índice de refracción, a esas temperaturas, del vidrio respecto a cada una de las longitudes de onda incidentes, cuya distribución viene dada por la *Ley de Planck*.

Si la radiación está totalmente polarizada en el plano paralelo al de reflexión, se demuestra que la fracción de la energía incidente que es reflejada viene dada por la fórmula de *Fresnel*:

$$E_{v1} = \left( \frac{\text{sen}(i - r)}{\text{sen}(i + r)} \right)^2$$

Si la radiación está totalmente polarizada en el plano perpendicular al de reflexión, la fórmula de *Fresnel* se expresa así:

$$E_{v2} = \left( \frac{\text{tg}(i - r)}{\text{tg}(i + r)} \right)^2$$

En estas fórmulas,  $i$  representa el ángulo de incidencia, y  $r$  el de refracción. Por definición de *índice de refracción*, sabemos que ambos ángulos están relacionados por la expresión:

$$n(l, T) = \frac{\text{sen } i}{\text{sen } [r(l, T)]}$$

En el caso de los vidrios silico-sodo-cálcicos, la experimentación demuestra que para una longitud de onda determinada (generalmente los **589,3 nm**), el índice de refracción no varía de manera significativa con la temperatura, afectando a la tercera cifra decimal de este índice, para variaciones de **0°C** a **1.500°C**. Algo similar ocurre con la dependencia de este índice con la longitud de onda: la influencia de la longitud de onda sobre  $n$  no afecta, a lo sumo, más que a la segunda cifra decimal. Si analizamos los diferentes valores del índice de refracción entre los vidrios industriales conocidos, vemos que para **589,3 nm** y a **25°C**, sus valores oscilan entre **1,51** a **1,52**, por lo que un valor de **1,515** proporciona una precisión suficiente para la estimación de un valor de  $e_c$ .

Mediante la integración:

$$R_{v1} = \int_0^{90} \left( \frac{\text{sen} \left( i - \arcsen \frac{i}{n} \right)}{\text{sen} \left( i + \arcsen \frac{i}{n} \right)} \right)^2 \cdot di$$

conocemos la fracción reflejada de la radiación total incidente desde todas las direcciones, con una polarización paralela al plano de reflexión.

Si la integración es:

$$R_{v2} = \int_0^{90} \left( \frac{\text{tg} \left( i - \arcsen \frac{i}{n} \right)}{\text{tg} \left( i + \arcsen \frac{i}{n} \right)} \right)^2 \cdot di$$

calcularemos la fracción reflejada, de la radiación total incidente desde todas las direcciones, con una polarización perpendicular al plano de reflexión. Se admite que, para una radiación presentando planos de polarización en todas las posiciones, la

fracción reflejada es:  $R_v \gg \frac{R_{v1} + R_{v2}}{2}$

Aplicando el valor de  $n = 1,515$ , obtenemos:

$$\begin{aligned} R_{v1} &= 0,2058 \\ R_{v2} &= 0,0899 \\ R_v &= 0,1478 \end{aligned}$$

Puesto que la radiación no reflejada es refractada hacia el interior del vidrio, y por tanto absorbida, se puede tomar el valor de  $e_v \gg 0,85$  para todo horno y "todo" vidrio, sin temor a errores significativos.

#### 9.4.- EL GRADO DE "AFINADO DEL VIDRIO"

Siguiendo con lo expuesto en el Capítulo II, §2.4, el grado de "afinado" de un vidrio depende de un conjunto de variables, que hemos relacionado según la fórmula siguiente:

$$(9.3.1) \quad A_f = A_{fo} \cdot B(\text{CO}_2) \cdot e^{\frac{E}{R \cdot T}} - F$$

El valor de  $A_f$  es arbitrario, y cuya representatividad es relativa y meramente orientativa. La temperatura que tomaremos en este caso será la de la superficie del vidrio en la zona en que este, debido a sus movimientos convectivos, entra en contacto con la mezcla vitrificable.

Al desarrollar el modelo, apreciamos que esta temperatura está directa e íntimamente relacionada con la temperatura de la corriente de retorno, y por lo tanto, con el valor de la temperatura de esta corriente en su punto de contacto con la solera de la cuba.

Para cada vidrio, y para cada horno, la relación (9.3.1) tomará unos valores numéricos distintos, pero si deseamos que el valor resultante  $A_f$  sea el mismo en todos ellos (el que se considera como de "afinado correcto"), la temperatura  $T$  en cada uno de deberá alcanzar un valor. que será característico para cada vidrio y para cada horno, de tal forma que siempre que la temperatura sea igual o superior a este, el afinado será bueno, en tanto que por debajo de él, el afinado empeorará de manera rápida (influencia exponencial). Esta temperatura, en la práctica, no puede medirse de manera directa. Sin embargo la temperatura de la solera, y muy particularmente cerca, ya de la salida del vidrio (frente a la "garganta", por ejemplo), puede medirse de manera precisa mediante termopares astutamente situados.

De todo lo dicho hasta ahora se deduce que se producirá una relación exponencial directa entre la temperatura de solera del horno y el grado de afinado, o dicho de otra manera, un control de la temperatura de solera en un horno nos dará inmediatamente una idea casi cuantitativa del grado de afinado que se puede obtener. Este es un hecho que en la práctica industrial está más que demostrado, hasta el punto que, normalmente, los hornos se conducen casi exclusivamente a través de la indicación de estos termopares, a los que denomina "pasantes" por su montaje especial, no aceptándose variaciones de estas temperaturas que superen los pocos grados centígrados.

#### 9.5.- ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE LAS VARIABLES Y PARÁMETROS

Con el fin de poder tener una idea previa del grado de precisión con es necesario determinar cada una de las variables y parámetros que el modelo maneja, se realizan sobre un "horno modelo" unos cálculos de sensibilidad de cada uno de ellos. Para ello, partimos de unos "**Valores de referencia**" y dejando constantes

todos los demás parámetros, hacemos variar uno (o en algún caso, un conjunto de ellos). Anotamos la variación obtenida, por aplicación de Modelo NOUFORN 55, de las siguientes variables, consideradas características:

Temperatura de vidrio en solera, ante "garganta",  $T_g$  °C  
Factor relativo de "afinado"  $A_f$   
Consumo de combustible (gas natural)  $C$ , Kg/h

Se obtienen así unos valores de estas variables –a los que llamamos **Valores nuevos**–. Se modifica sobre el modelo la "curva de temperaturas del Radiador" (caracterizada por la de su *Punto Caliente*) hasta obtener un factor relativo de afinado igual al primitivo –Valor corregido por *afinado*–, anotando el cambio de las variables ya indicadas.

VALORES NUMÉRICOS QUE DEFINEN AL "HORNO MODELO"

Longitud interior de la cuba,  $L_o = 1.470$  cm  
Anchura interior de la cuba,  $A_n = 950$  cm  
(Anchura de la zona de cálculo)  $a_n = 1$  cm; modelo 2D)  
Profundidad del vidrio,  $H = 147$  cm  
Altura de la superestructura,  $h_s = 300$  cm  
Emisividad del "radiador",  $\epsilon_r = 0,8$   
Emisividad del "sumidero" (materias vitrificables),  $\epsilon_c = 0,9$   
Emisividad del "sumidero" (superficie vidrio),  $\epsilon_v = 0,85$   
Estructura de calorifugado, que dan unas pérdidas caloríficas, que se distribuyen, en su vida media, así:

Lateral de cuba	192	Termías/h
Ventilación	426	
Solera	259	
Diversos (electrodos, etc.)	59	
Resto (superestructura)	1.244	
<b>TOTAL</b>	<b>2.180</b>	

1ª Cámara

Anchura de cada celda,  $a_{a1} = 14$  cm  
Largura de cada celda,  $b_{b1} = 14$  cm  
Número de celdas, **27x36**  
Altura del empilado,  $h_{h1} = 882$  cm  
Densidad del material,  $r_{r1} = 3,3$  g/cm<sup>3</sup>  
Calor específico del material,  $C_{rr1} = 0,25$  cal/g.°C

2ª Cámara

Anchura de cada celda,  $a_{a2} = 17$  cm  
Largura de cada celda,  $b_{b2} = 17$  cm  
Número de celdas, **20x22**  
Altura del empilado,  $h_{h2} = 758$  cm  
Densidad del material,  $r_{r2} = 2,2$  g/cm<sup>3</sup>  
Calor específico del material,  $C_{rr2} = 0,25$  cal/g.°C

Fracción de fusión directa,  $F_d = 0,45$   
 Pérdidas totales de calor del horno,

$S_{per} = 605,6 \text{ cal/cm.seg}$

Composición de la mezcla vitrificable, y propiedades físicas del vidrio obtenido:

Ver Capítulo I

Entalpía de formación del vidrio (5% humedad)

$H_{FM} = 194,74 \text{ cal/g vid}$

Temperatura de "fusión",

$T_e = 1.411 \text{ °C}$

Calentamiento de los gases a  $T_e$ ,

$H_{FG} = 111,8 \text{ cal/g vidrio}$

Período entre dos inversiones de la combustión,

$P_{ER} = 1.200 \text{ segundos}$

Combustible, *Gas Natural*

$PCI = 11,707 \text{ term/Kg}$

Exceso de aire de combustión

20 %

Producción del horno,

$M_o = 420 \text{ Tm/día}$

$= 4,96032 \text{ g/cm.seg}$

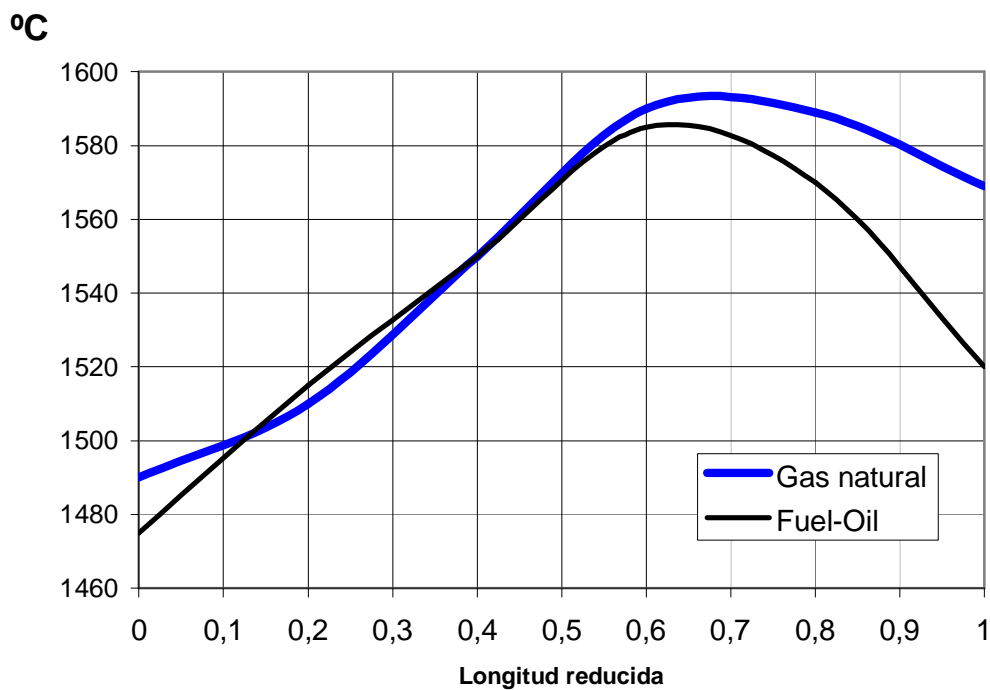
Proporción de calcín,

$C_{asc} = 20\%$

Temperatura ambiente,

$T_a = 25 \text{ °C}$

### CURVAS DE TEMPERATURAS DEL RADIADOR



### 9.5.1.- Cambios en la composición del vidrio

Expresión del cambio producido:

Componente	% en peso inicial	% en peso final
SiO <sub>2</sub>	73,20	70,98
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,51	1,49
Na <sub>2</sub> O	13,22	14,89
K <sub>2</sub> O	1,12	1,12
MgO	0,03	0,03
CaO	10,62	11,20
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,10	0,10
SO <sub>3</sub>	0,20	0,20

### Resultados obtenidos

Variables estudiadas	Valores de referencia	Valores nuevos	Valores corregidos por <i>afinado</i>
Temperatura P.C., °C	1.591	1.591	1.574
Temperatura Tg, °C	1.337	1.364	1.337
Consumo de gas, Kh/h	1.520	1.515	1.491
Factor de afinado	0,994	0,415	0,984

### Observaciones

- 1<sup>a</sup>- La sensibilidad del modelo a los cambios de composición es importante, por lo que esta deberá ser establecida en todos los componentes, como regla general, con una precisión que nos asegure la primera cifra decimal porcentual.
- 2<sup>a</sup>- Un aumento de álcalis, en detrimento especialmente del contenido en sílice, provoca una serie de fenómenos que suponen, a calidad constante, una disminución de:
  - <sup>a</sup> Temperaturas en superestructura: mayor duración de esta.
  - <sup>a</sup> Menores consumos: economía energética y medioambiental.
- 3<sup>a</sup>- Una optimización global de costos es aconsejable antes de decidir ninguna composición de vidrio.

4ª- Obsérvese como, una constancia en el afinado, supone una constancia en la temperatura  $T_g$  (véase §9.3).

9.5.2.- Proporción de calcín en la mezcla vitrificable,  $c$

Cambio producido: desde un 20% de calcín sobre el vidrio producido, a un 40%.

Resultados obtenidos

VARIABLES ESTUDIADAS	Valores de referencia	Valores nuevos	Valores corregidos por afinado	$\frac{\Delta X}{\Delta c}$
Temperatura P.C., °C	1.591	1.591	1.576	0
Temperatura $T_g$ , °C	1.337	1.361	1.331	1,2
Consumo de gas, Kh/h	1.520	1.408	1.386	-5,6
Factor de afinado	0,994	0,369	0,930	-0,03

Observaciones

Un error en la determinación de la tasa de calcín de un punto, conduce a errores de temperaturas de más de 1 °C, y de consumos del orden del 5%. Es por tanto, un valor a determinar con una precisión afectando a la primera cifra decimal.

9.5.3.- Caudal de vidrio extraído del horno,  $M_o$

Cambio producido: desde 420 Tm/día a 380 Tm/día

Resultados obtenidos

VARIABLES ESTUDIADAS	Valores de referencia	Valores nuevos	Valores corregidos por afinado	$\frac{\Delta X}{\Delta M_o}$
Temperatura P.C., °C	1.591	1.591	1.580	0
Temperatura $T_g$ , °C	1.337	1.360	1.338	0,575
Consumo de gas, Kh/h	1.520	1.408	1.393	-2,8
Factor de afinado	0,994	0,505	0,987	-0,01

Observaciones

Un error en la determinación de  $M_o$  de 1 Tm/día, conduce a errores de temperaturas menores de 1 °C, y de consumos menores del 2%. Es por tanto, un valor a determinar con una precisión afectando a la primera cifra decimal.

9.5.4.- Poder calorífico de combustible, P.C.I.

Cambio producido: desde 11,707 Term/Kg a 10,707 Term/Kg.

Resultados obtenidos

VARIABLES ESTUDIADAS	Valores de referencia	Valores nuevos	Valores corregidos por afinado	$\frac{\Delta X}{\Delta PCI}$
Temperatura P.C., °C	1.591	1.591	1.591	0
Temperatura Tg, °C	1.337	1.337	1.337	0
Consumo de gas, Kh/h	1.520	1.715	1.715	195
Factor de afinado	0,994	0,994	0.994	0

Observaciones

Un error en la determinación del P.C.I de 0,1 Term/Kg, no afecta en absoluto a las temperaturas consideradas, y aumenta el consumo en un 1%. Es por tanto, un valor a determinar con una precisión afectando a la primera cifra decimal.

9.5.5.- Exceso de aire de combustión

Cambio producido: desde 20 % a 30 %.

Resultados obtenidos

VARIABLES ESTUDIADAS	Valores de referencia	Valores nuevos	$\frac{\Delta X}{\Delta E}$
Temperatura P.C., °C	1.591	1.591	0
Temperatura Tg, °C	1.337	1.337	0
Consumo de gas, Kh/h	1.520	1.546	2,6
Factor de afinado	0,994	0,994	0

Observaciones

Un error en la determinación del exceso de aire de un punto porcentual, conduce a errores sólo de consumo de combustible, del orden del 0,2 %. El caudal de aire de combustión se determina mediante los oportunos caudalímetros, y se verifica "a posteriori" a través del análisis de los humos, particularmente, del contenido de O<sub>2</sub> libre en ellos. Como puede verse, no es una fuente importante de error.

### 9.5.6.- Pérdidas térmicas a través de las paredes del sistema

En este caso hay que distinguir entre pérdidas totales y pérdidas sólo en la cuba que contiene el vidrio líquido.

En el primer caso, el error en la estimación de estas pérdidas afecta casi exclusivamente al consumo de energía. En el segundo, afecta también a la distribución de temperaturas del vidrio, y por tanto, a su calidad. Vamos a estudiar solamente este segundo caso.

Cambio producido: desde 265,4 cal/seg a 398,1 cal/seg (+50 %).

#### Resultados obtenidos

Variables estudiadas	Valores de referencia	Valores nuevos	Valores corregidos por afinado
Temperatura P.C., °C	1.591	1.591	1.598
Temperatura Tg, °C	1.337	1.318	1.332
Consumo de gas, Kh/h	1.520	1.512	1.522
Factor de afinado	0,994	1,523	0,989

#### Observaciones

- 1<sup>a</sup>- Un fuerte error en el efecto de calorifugado de la solera, produce un deterioro del afinado, o la necesidad de subir las temperaturas de la superestructura para compensar este efecto.
- 2<sup>a</sup>- La temperatura de las soleras, a calidad comparable, es algo menor.
- 3<sup>a</sup>- El consumo de combustible no se ve alterado de manera muy significativa, puesto que las mayores pérdidas se ven compensadas por la menor temperatura de salida del vidrio del horno.

### 9.5.7.- Emisividad de la superestructura, $e_r$

Cambio producido: desde 0,8 a 0,7

#### Resultados obtenidos

Variables estudiadas	Valores de referencia	Valores nuevos	Valores corregidos por afinado	$\frac{\Delta X}{\Delta \epsilon_r}$
Temperatura P.C., °C	1.591	1.591	1.604	0
Temperatura Tg, °C	1.337	1.309	1.337	-280

Consumo de gas, Kh/h	1.520	1.507	1.527	-130
Factor de afinado	0,994	2,410	0,994	14,16

Observaciones

A la vista de estos resultados, no cabe la menor duda de la importancia de este valor para todos los resultados del estudio sobre el modelo. Por esta razón, este parámetro será uno de los que se determinarán en cada caso como uno más de los que intervienen en la correlación múltipl, que se realizará para el calibrado del modelo con respecto a la realidad observable.

9.5.8.- Emisividad de la mezcla vitrificable,  $e_c$

Cambio producido: desde 0,9 a 0,8

Resultados obtenidos

Variables estudiadas	Valores de referencia	Valores nuevos	Valores corregidos por afinado	$\frac{\Delta X}{\Delta \epsilon_c}$
Temperatura P.C., °C	1.591	1.591	1.593	0
Temperatura Tg, °C	1.337	1.334	1.337	-30
Consumo de gas, Kh/h	1.520	1.520	1.522	0
Factor de afinado	0,994	1,075	0,994	0,81

Observaciones

La influencia de este valor sobre los resultados es claramente menor que en el caso anterior, por lo que aceptaremos su exactitud a la segunda cifra decimal, si bien este valor será verificado a través de los estudios de correlación.

9.5.9.- Emisividad del vidrio del baño,  $e_v$

Cambio producido: desde 0,85 a 0,83

Resultados obtenidos

Variables estudiadas	Valores de referencia	Valores nuevos	Valores corregidos por afinado	$\frac{\Delta X}{\Delta \epsilon_v}$
Temperatura P.C., °C	1.591	1.591	1.592	0
Temperatura Tg, °C	1.337	1.335	1.337	-100
Consumo de gas, Kh/h	1.520	1.520	1.522	0
Factor de afinado	0,994	1.045	0,994	-2,55

### Observaciones

La influencia es importante. sin embargo, los estudios teóricos realizados al respecto (ver §2 de este Capítulo) nos muestran que en principio, el error es menor de 0,02 unidades, por lo que el valor tomado como media teórica de 0,85 lo supondremos un dato.

Más adelante podremos ver que en algunos casos (vidrios "reducidos") flota en el baño una pequeña cantidad de espuma, a veces imperceptible, pero que provoca una fuerte disminución del valor aparente de esta emisividad. Son casos excepcionales, que no pueden ser tomados como modelos para los cálculos de calibrado. Más bien todo lo contrario: cuando en un horno se observa un comportamiento fuertemente anómalo de las temperaturas con respecto al modelo, deberá investigarse causas tales como la que se acaba de apuntar.

#### 9.5.10.- Fracción fundida por la parte superior, $F_d$

Cambio producido: desde 0,45 a 0,55

#### Resultados obtenidos

VARIABLES ESTUDIADAS	Valores de referencia	Valores nuevos	Valores corregidos por afinado	$\frac{\Delta X}{\Delta F_d}$
Temperatura P.C., °C	1.591	1.591	1.580	0
Temperatura Tg, °C	1.337	1.358	1.334	280
Consumo de gas, Kh/h	1.520	1.529	1.510	90
Factor de afinado	0,994	0,447	0,980	-5,47

### Observaciones

Este valor es uno de los que forman parte del calibrado del modelo. Nótese, sin embargo, que siendo grande su influencia, cuanto menor es la velocidad de disolución de la mezcla vitrificable (mayor valor de  $F_d$ ), mejores son los resultados de calidad de vidrio obtenidos.

Un aumento de "grosor" de la interfase –por disminución de la tasa de  $SO_4^{=}$  conservando la de reductores, por ejemplo– produciría una mejora del afinado. Cualitativamente, este es un hecho experimental repetido en multitud de hornos.

### 9.5.11.- "Factor de agitación, $A_g$ "

Cambio producido: desde 1 a 1,5

#### Resultados obtenidos

VARIABLES ESTUDIADAS	Valores de referencia	Valores nuevos	Valores corregidos por afinado	$\frac{\Delta X}{\Delta F_d}$
Temperatura P.C., °C	1.591	1.591	1584	0
Temperatura Tg, °C	1.337	1.352	1.337	30
Consumo de gas, Kh/h	1.520	1.524	1.512	8
Factor de afinado	0,994	0,524	0,979	-0,94

#### Observaciones

En el Capítulo V, y particularmente en el §5.4.3, se puso ya de manifiesto la dificultad que entraña la modelización de las corrientes de convección en una cuba con vidrio a altas temperaturas. En ese Capítulo se propone una solución simplificada, en la que se introduce un coeficiente de corrección experimental  $A_g$ , a determinar. Su influencia en los resultados no es irrelevante, como puede verse.

Debemos hacer dos observaciones a los valores deducidos experimentalmente:

- 1ª- De hecho cada horno presenta un Factor de Agitación propio, debido a sus peculiaridades geométricas, tales como es estado de desgaste general, muy particularmente el del "barraje" y garganta, etc.
- 2ª- Ciertos hornos están equipados con sistemas de barboteadores, con distribuciones de estos diferentes y con intensidades distintas de burbujeo, así como con electrodos verticales implantados en solera, con lo que dicho coeficiente debería ser aumentado en consecuencia, pero en cantidades que, por el momento son muy difíciles de determinar.

No obstante, los resultados que se han obtenido muestran que esta factor suele situarse en valores que oscilan, como máximo, entre 1 y 1,4, lo que simplifica algo el problema.

### 9.6.- RESULTADOS EXPERIMENTALES OBTENIDOS

Se expresan en la tabla adjunta.

A estos resultados hay que hacer algunos comentarios. Estos se expresan en la página siguiente.

VALORES OBTENIDOS MÁS PROBABLES

HORNO	COLOR	$e_r$	$F_d$	$\% \frac{SO_4Na_2}{CO_3Na_2}$	$A_g$	Error en cálculo de consumo %
I	Blanco	0,805	0,45	3,1	1,3	1,5
II	Verde Red.	0,802	0,57	***	1,0	4,5
III	Blanco	0,810	0,47	2,5	1,4	3,7
IV	Topacio	0,810	0,59	***	1,4	3,9
V	Verde Oxi.	0,810	0,50	2,1	1,4	4,1
VI	Blanco	0,790	0,43	4,3	1,0	5,0
VII	Blanco	0,803	0,46	2,9	1,2	2,7

OBSERVACIONES

- 1<sup>a</sup>- Los valores de la emisividad de los refractarios de la superestructura de todos los hornos observados, se sitúa alrededor del valor ya anunciado en la bibliografía.
- 2<sup>a</sup>- En el factor  $F_d$  (proporción de vidrio generado por "fusión directa") presenta valores que, tal y como era de esperar, dependen de la relación de sulfatos y carbonatos, así como de la presencia de reductores (caso de los vidrios de colores Topacio y Verde Reducido).
- En el primer caso, se ha añadido una columna en la que se refleja la relación  $\frac{SO_4Na_2}{CO_3Na_2}$  en tanto por ciento. En ella se observa una correlación cualitativa entre este cociente y los valores de  $F_d$ . No es posible establecer una relación cuantitativa con los datos de que se dispone; esto exigiría estudios más numerosos y profundos.
  - Para los vidrios llamados "reducidos" (*Topacio y Verde Reducido*) los valores de  $F_d$  son claramente superiores a los correspondientes a los vidrios "oxidados".
- 3<sup>a</sup>- El valor de  $A_g$  es prácticamente igual a 1 si no hay agitación mecánica, y casi puede dársele el valor 1,3/1,4 para el caso de cubas agitadas mediante una línea de barboteadores (valores en rojo en la tabla).

Con todo esto, podemos dar al modelo como calibrado.

### 9.7.- USOS DEL MODELO NOUFORN 55

A partir del conjunto de datos que se expusieron en el §9.2, es posible realizar simulaciones en las que se alteren:

- la geometría del horno (incluyendo la distribución de su califugado)
- la naturaleza y proporción de las materias primas (especialmente la tasa de calcín y el contenido en óxidos alcalinos)
- el tipo de energía utilizada (combustibles, apoyos eléctricos, oxicomustión, etc.)
- temperaturas de superestructura (resistencia de los materiales)

obteniendo en cada hipótesis un resultado, de orden relativo y comparativo, sobre la calidad del vidrio obtenido, para mejorarla, o simplemente mantenerla con el fin de:

- a) Diseñar hornos, con optimización del conjunto:

**[inversión económica / costos de explotación / mantenimiento–duración].**

- b) Diagnosticar hornos ya existentes y estudiar las posibles mejoras en su explotación.
- c) Calibrar el modelo con hornos ya existentes y generar un algoritmo que permitiría su regulación automática mediante sistemas que, ya patentados por el autor y sus colaboradores, están a la disposición de todo aquel se interese por ellos.

### 9.8.- UN EJEMPLO DE APLICACIÓN

#### 9.8.1.- Planteamiento del ejemplo

Partimos de un primer diseño de horno, que presenta una geometría igual a la descrita en el §9.5.

El vidrio base tendrá una composición y, en consecuencia, unas propiedades iguales a las expresadas en §1.3.

Vamos a determinar, como ejemplo, la relación entre la producción máxima posible, con una "calidad" constante, y el consumo de combustible correspondiente, en función de:

- Temperatura máxima en la bóveda (entre 1.500°C y 1.600°C)
- Proporción de Na<sub>2</sub>O en su composición (entre un 11,5% y 14,5%)

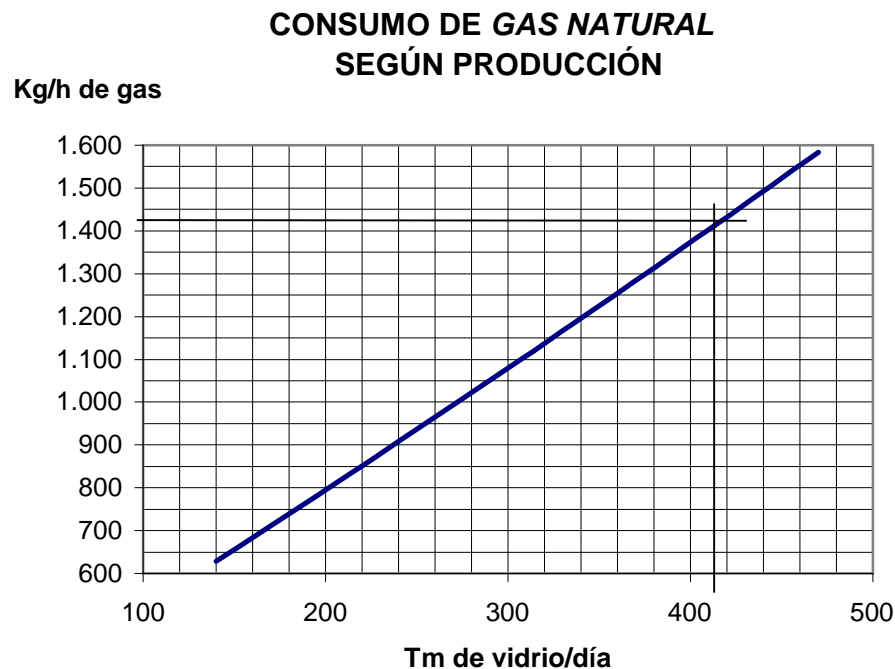
Luego, pasaremos la composición inicial a *vidrio reducido* ("topacio" o "amarillo") y buscaremos la mejor forma de obtener una capacidad de producción similar a la obtenida previamente con el vidrio "blanco".

El combustible será un *Gas Natural*, de composición:

Componente	% en volumen
CH <sub>4</sub>	89,36
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	8,3
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	1,32
n-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0,21
i-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0,16
n-C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	0,006
i-C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	0,008
C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	0,00
Otros	0,636
P.C.I	11.707 Kcal/Kg
Densidad	0,797 Kg/Nm <sup>3</sup>

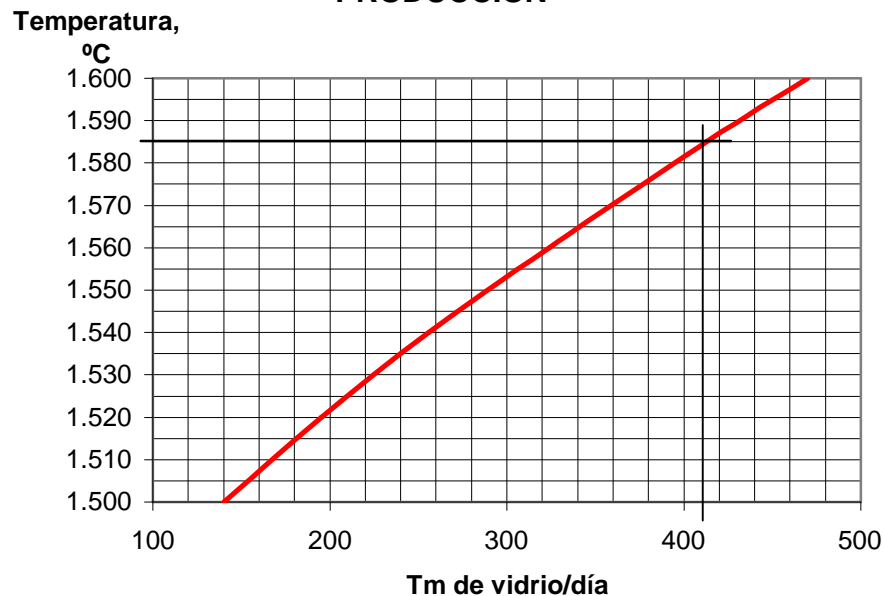
El comburente es aire ambiente.

### 9.8.2.- Resultados



Punto de trabajo:

### TEMPERATURA MÁXIMA DE BÓVEDA SEGÚN PRODUCCIÓN



Temperatura máxima en bóvedas: 1.585°C

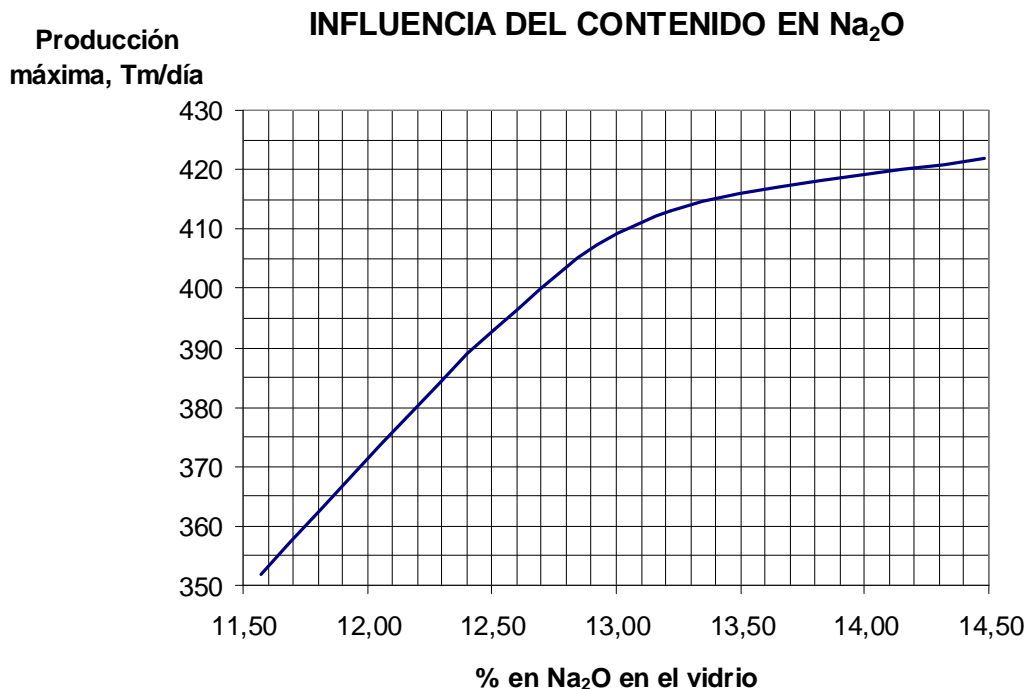
Producción: 413 Tm/día

Consumo de combustible: 1.411 Kg/h

Con estos datos, el programa ofrece un conjunto de resultados complementarios, tales como:

- Carta de temperaturas más importantes en el interior del horno
- Caudales convectivos de vidrio
- Caudal de aire necesario para la combustión
- Caudal de humos producidos producidos
- Composición de los humos
- Variación con el tiempo de la temperatura de los humos salientes
- Temperaturas de los humos en cada punto de las cámaras de recuperación
- Temperaturas de los empilados en cada punto de las cámaras de recuperación

Ahora, conservando la composición inicial del vidrio, alteramos la proporción de carbonato sódico, de manera a modificar de manera uniforme su contenido en  $\text{Na}_2\text{O}$ , entre los límites ya comentados. A medida que este contenido desciende, para conservar la "calidad" del vidrio constante, manteniendo las temperaturas máximas del radiador constantes en 1.585°C (valor que se supone el máximo alcanzable con seguridad con los materiales de construcción utilizados), es preciso disminuir la producción. En el gráfico adjunto se detalla esta evolución.



Resulta interesante resaltar el hecho –que el modelo pone de manifiesto– de que a partir de un contenido de Na<sub>2</sub>O superior al 13%, la influencia del contenido en álcalis no influye de forma decisiva en la producción posible del horno, de tal forma que la pequeña influencia que puede manifestarse, es compensada fácilmente por el operador del horno, variando levemente las temperaturas de radiación (temperaturas de bóvedas). Sin embargo, cuando este contenido baja de este valor, la influencia es cada vez mayor y por lo tanto, sensible. Las “temperaturas de fusión” se ven incrementadas, en estos casos, peligrosamente. Esta es la razón por la que la mayor parte de los vidrios silico-sodo-cálcicos industriales contienen proporciones de álcalis que se sitúan entre un 13% y un 15%.

Dado el precio de los aportadores de álcalis al vidrio, se intenta fabricarlo con el contenido más bajo posible, lo que supone un ahorro en materias primas, pero un aumento de costo por menor productividad y mayor desgaste de los materiales de construcción del horno. Es posible, sin embargo, conservar la “calidad” y las temperaturas de bóvedas del horno, conservando también la capacidad de producción. Esto se consigue mediante el “apoyo eléctrico”, tecnología que será objeto de un estudio complementario.

El modelo puede darnos información acerca de la potencia eléctrica que hay que añadir para mantener la “calidad” a temperaturas de bóvedas constantes (máxima 1.585°C, por ejemplo), así como el consumo de combustible correspondiente. A partir de estos datos, es posible realizar un estudio económico, buscando el punto de máxima rentabilidad en cada momento.

En el ejemplo anterior, la modelización nos conduce a las conclusiones siguientes:

- Con esta composición de vidrio de base, elaborar un vidrio de "calidad envases" con menos de un 12% de  $\text{Na}_2\text{O}$  (contenido en álcalis del 13%), es muy difícil, a menos que se aumenten las temperaturas de la superestructura de manera importante (Punto caliente cercano a los  $1.600^\circ\text{C}$ ).
- Con un contenido en  $\text{Na}_2\text{O}$  del 12,5% y una temperatura en el punto máximo de las bóvedas de  $1.585^\circ\text{C}$ , la capacidad de producción puede mantenerse en las 413 Tm/día con un aporte de 400 Kw y un consumo de 1.381 Kg/h de *Gas Natural* (frente a los 1.411 Kg/h en el caso inicial).
- Para contenidos superiores de  $\text{Na}_2\text{O}$ , no es preciso el apoyo eléctrico, y los consumos se reducen ligeramente. No es aconsejable sobrepasar el 13,2% de  $\text{Na}_2\text{O}$ .

Si conservando todas las condiciones iniciales (ver §9.5 y §1.3), añadimos a la mezcla vitrificable reductores para el paso del vidrio a color topacio ("vidrio reducido"), la calidad del afinado, según el modelo, se deteriora de manera muy importante, debido a la disminución de la conductividad térmica aparente del vidrio. Debe disminuirse la capacidad de producción a 330 Tm/día para conservar la calidad.

En estos casos se suelen diseñar hornos dotados de sistemas de agitación, tales como barboteadores y similares. Su eficacia es dudosa, al introducir otros elementos parásitos de distorsión de la calidad. Un sistema eficaz de agitación podría conseguir una calidad comparable con la obtenida en color blanco con 360 Tm/día como máximo.

La mejor solución en este caso, de nuevo la aporta el apoyo eléctrico. Con una potencia añadida de 925 Kw y un consumo de gas natural de 1.329 Kg/h se recupera la producción de 413 Tm/día, con una buena calidad.