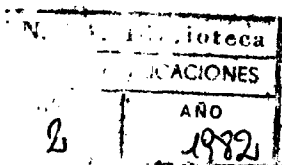


MODELO SIMPLIFICADO PARA EL ESTUDIO DEL CONTROL TERMICO DE UN HORNO
DE RECOCIDO EN ALTO VACIO

Horacio Aldo Sergio
H.Cingolani y S.Pissanetzky
Centro Atómico Bariloche*



1. Generalidades

En la figura 1 se muestra esquemáticamente una sección del horno estudiado con una carga de 380 tubos. El objetivo del trabajo es predecir la evolución de la temperatura en cada uno de los tubos y estudiar el comportamiento global del horno inyectando potencia eléctrica en las resistencias de calefacción.

Para dicho estudio se ha desarrollado un modelo de todo el horno considerando el intercambio de potencia entre la retorta y la carga, entre la retorta y la superficie interior del aislante, la entrada de potencia y la pérdida a través del aislante.

Para el estudio de la carga se han desarrollado dos modelos; uno de detalle, que sigue la evolución de temperatura de cada tubo y de cada punto del carro; y otro aproximado que responde en forma similar al anterior pero con una geometría sencilla que requiere muy poco tiempo de cálculo.

2. Modelo de detalle

El interior de la retorta con el carro y 380 tubos de carga se ha modelado en detalle utilizando un sistema de rutinas previamente desarrolladas en el CAB /1/, /2/. En este modelo se calcula en pasos temporales siendo un dato la distribución de temperaturas al comienzo de los mismos. Cada cavidad está dividida en lados rectos entre los cuales se calcula el calor intercambiado por el método de Radiación Neta. Estos valores son los datos para calcular la nueva distribución de temperatura al final del paso de tiempo por conducción en los elementos metálicos por el método de Elementos Finitos.

El sistema de rutinas ha sido, ampliamente probado y contrastado con mediciones efectuadas en un horno chico experimental que se describe en un trabajo anterior /2/. Las consideraciones hechas en el mismo son aplicables al presente trabajo.

Este modelo ha sido corrido con la geometría mostrada en la figura 1 (parte interna) en la computadora IBM 360/44 del CAB. En la figura 3 se muestra la evolución de temperatura obtenida en el carro y en los tubos indicados en la figura 1, con una temperatura inicial de 20°C en la carga y de 500°C, constante, en la retorta. El tiempo máximo graficado corresponde a 4 hs 30' de calentamiento.

Se observa que el tubo más interno recién alcanzó una temperatura de unos 110°C mientras el tubo contiguo al carro llegó a unos 483°C. El tiempo de computación fue de 1h 40'. Por la forma de las curvas y la experiencia del trabajo anterior se infiere que el tiempo para que el tubo más interno llegue a 498°C sobrepasará las 12 o 14hs, lo que corresponde a un tiempo de computación del orden de las 5hs. Estos tiempos hacen prohibitivo el uso intensivo del modelo en pruebas reiteradas.

* Comisión Nacional de Energía Atómica.

3. Modelo aproximado

Por ese motivo se resolvió desarrollar un modelo simplificado.

Las pruebas hechas con el modelo de detalle mostraron que no se cometían errores apreciables si se consideraba cada tubo isotérmico debido a su buena conductividad térmica. En el modelo aproximado se ha reemplazado cada capa de tubos, desde la periferia hacia el centro, por un tubo grande, concéntrico con la retorta, como se observa en el figura 2.

Para mejorar el modelo aproximado se ha dejado abierto el 1er. tubo en su parte superior; se ha dado al 1er. tubo el mismo volumen que al carro ($80,44 \text{ cm}^3$ para 1cm de longitud de horno), y al resto de los tubos el mismo volumen que los 380 tubos reales ($74,52 \text{ cm}^3$) y las correspondientes emisividades y capacidades térmicas.

El calor radiado se calcula con la fórmula dada para tubos concéntricos /3/.

Para esta evaluación se impone que los radios que corresponden a la radiación entre 2 tubos contiguos sean iguales, lo cual aproxima mejor al mecanismo real (y al modelo de detalle).

La figura 3 muestra la evolución de temperatura de los tubos del modelo aproximado y la potencia absorbida.

Se observa una gran similitud con el gráfico del modelo de detalle, especialmente en la curva de la potencia. El fundamento del modelo aproximado y la similitud de la respuesta de ambos modelos nos permiten tomar a aquel como suficientemente exacto para la finalidad perseguida que es el estudio del horno completo con la carga y el aislante térmico en cualquier condición.

Un resultado de interés ha sido observar una demora de 13hs 25' para que el tubo más interno llegue a una temperatura de 498°C .

4. Modelo completo

El modelo completo incluye la inyección de potencia en la resistencia de calefacción; la transmisión de calor a través del aire hacia la retorta, por radiación, conducción y convección; las pérdidas a través del aislante y el modelo de la carga que puede ser el real o el aproximado.

La temperatura de la retorta que antes se fijaba en 500°C será ahora una variable dependiente. El modelo completo resuelve el siguiente problema: Dada la potencia de entrada, en función del tiempo, arbitraria, determinar la evolución de la temperatura en cada punto. *

En cada paso de tiempo es dato la distribución de temperatura al comienzo del intervalo y la potencia de entrada. El programa calcula la distribución de temperatura al final del intervalo desarrollando la siguiente secuencia:

1. Con uno de los modelos anteriormente descriptos calcula la potencia transferida entre carga y la retorta.
2. Calcula la potencia que intercambia la retorta con la superficie interna del aislante por radiación.
3. Calcula la potencia que intercambia la retorta con el aire por conducción y convección.
4. Calcula la potencia neta de la retorta y su variación de temperatura.
5. Dada la potencia externa calcula la potencia neta que ingresa al aislante.
6. Se resuelve por diferencias finitas el problema de conducción en el aislante, obteniéndose como resultado la nueva distribución de temperaturas y la pérdida hacia el aire exterior.
7. Se determina la potencia externa que se inyectará en el próximo intervalo.

Se han usado valores aproximados de capacidad calorífica y conductividad térmica del aislante. Estos valores deberán ser corregidos de acuerdo a las mediciones que se efectuen puesto que sólo se han considerado los valores dados para el cerámico, y no se ha tenido en cuenta el efecto de otros materiales como por ejemplo el metal que sujeta la masa del aislante.

5. Horno controlado

Si la potencia externa que se inyecta en cada paso de tiempo se calcula en base al valor de la temperatura en algún punto se está simulando al horno controlado. El objetivo del control es llevar la temperatura de la carga a un valor prefijado en el menor tiempo posible y mantenerlo en ese valor lo más estable posible durante un tiempo prefijado.

El circuito electrónico que efectuará el control será del tipo proporcional-integral-diferencial que logra eficientemente su objetivo.

Utilizando la carga ficticia se han efectuado una serie de corridas del programa mostrando el efecto del control.

6. Conclusiones

1. La carga ficticia representa bien el comportamiento global de la carga real como puede observarse en la figura 3. No sólo la curva de la potencia absorbida sino también las de temperatura muestran un comportamiento similar.

2. Con la carga de 380 tubos se observa que el tubo más interno demora unas 13,5 horas en llegar a 498°C y unas 15 horas para llegar a 499°C. Se ve también que sacando una cantidad pequeña de tubos internos (unos 20) dichos tiempos se reducen en sólo 20 minutos. Si se eliminan al carro los tiempos se reducen en apenas un 7% pues así se ha visto en las corridas con esta condición.

Además se deduce fácilmente que un factor del mismo orden (7%) o aun menor podría ganarse sobrecalentando al horno para que el carro llegue más rápidamente a los 498°C.

Referencias

- /1/ S.Pissanetzky, Nuclear Engineering and Design 56, 359-368.
- /2/ Numerical simulation of the transient temperature distribution within the cladding material during annealing in a high vacuum furnace.
S.Pissanetzky, R.Volpi, H.Cingolani y J.C.Almagro. Presentado para su publicación en "Nuclear Engineering and Design".
- /3/ J.P.Holman, Heat transfer. Pág.300 (McGraw-Hill, 1976).

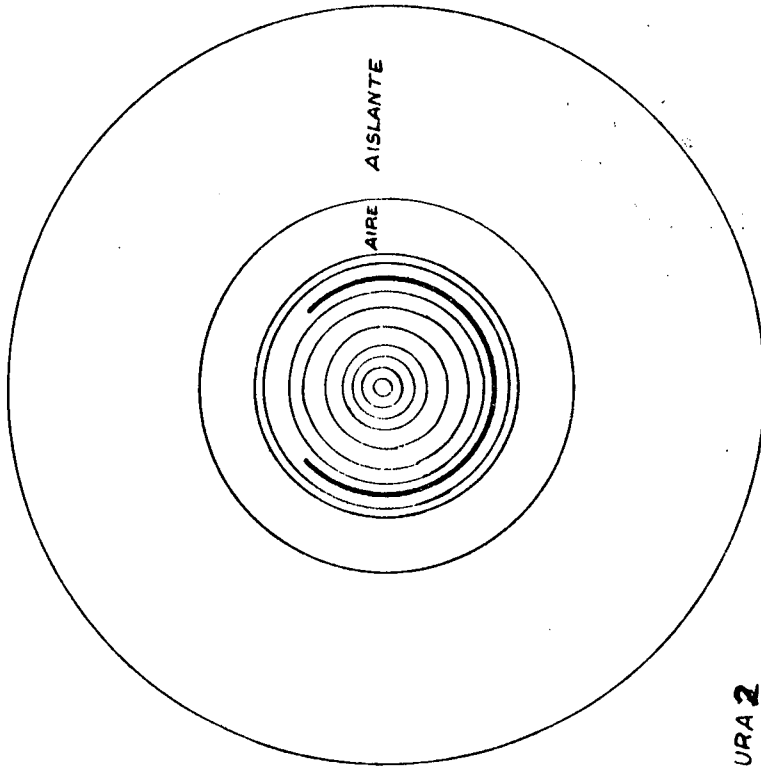


FIGURA 2

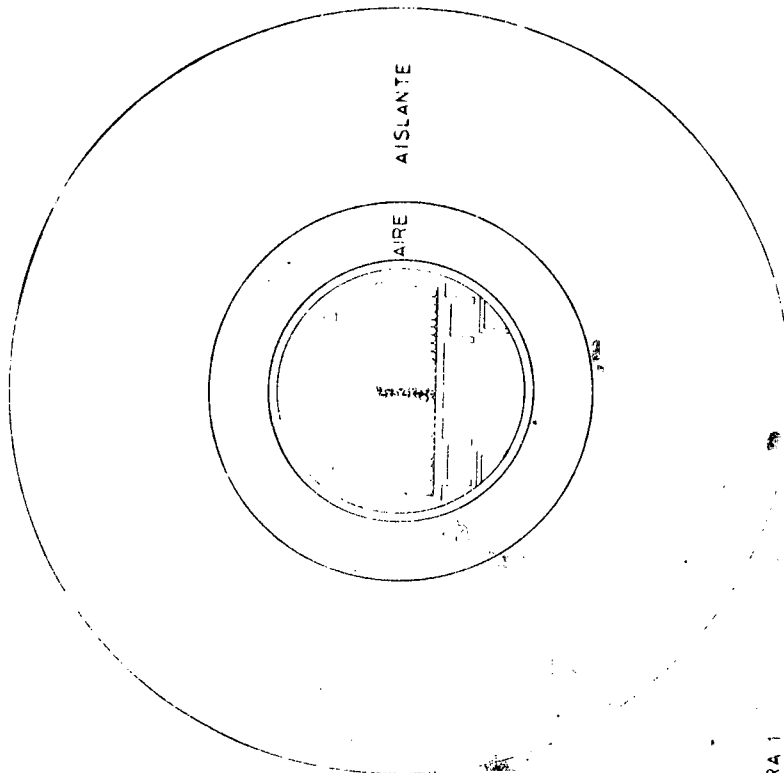


FIGURA 1

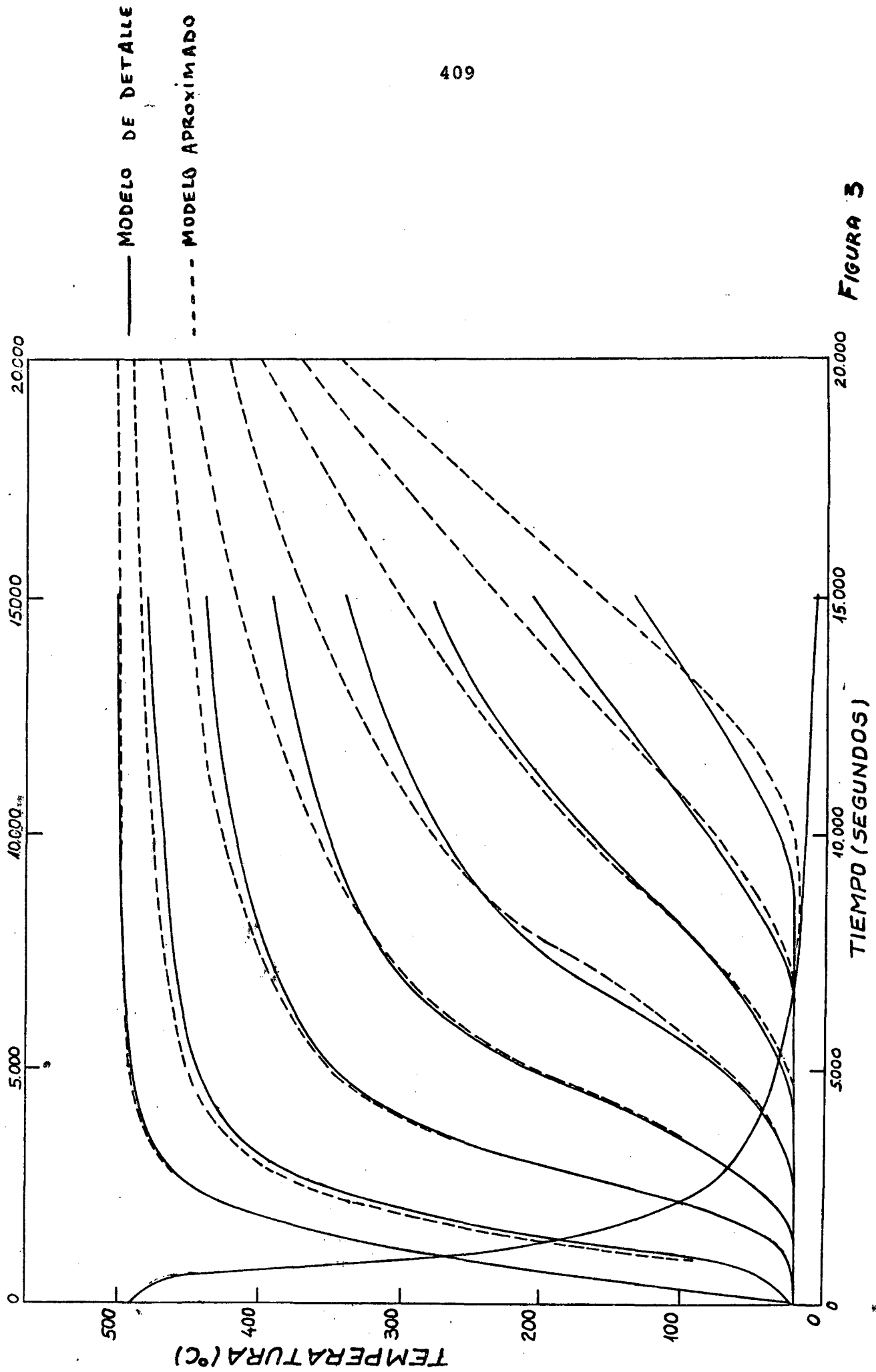


FIGURA 3