

T

MOR m



ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL
Facultad de Ingeniería Mecánica



“MODELAJE DE LA TRANSFERENCIA DE
CALOR EN UN HORNO LADRILLERO”

PROYECTO DE GRADO
Previo a la obtención del Título de
INGENIERA MECANICA

Presentado por:
Elena Leonor *Moreira* Marcillo

Guayaquil - Ecuador
1989

DECLARACION EXPRESA

"La responsabilidad por los hechos, ideas y doctrinas expuestos en este Proyecto de Grado, me corresponden exclusivamente; y, el patrimonio intelectual del mismo a la ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL".

(Reglamento de Tópico de Graduación).


ELENA MOREJÓN M.

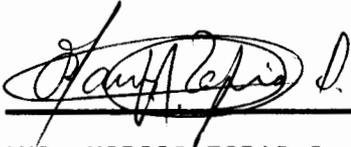
AGRADECIMIENTO

Al Dr. Alfredo Barriga, director del Proyecto de Grado, por su ayuda y colaboración para la realización de este trabajo.

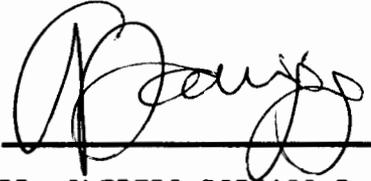
Al Centro de Investigación Científica y Tecnológica, por las facilidades brindadas para la realización del proyecto.

DEDICATORIA

A MIS HERMANAS



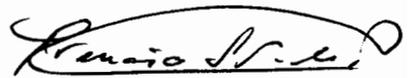
**ING. MARCOS TAPIA Q.
SUBDECANO DE LA FACULTAD
DE INGENIERIA MECANICA**



**DR. ALFREDO BARRIGA R.
DIRECTOR DE PROYECTO**



**ING. JORGE DUQUE R.
MIEMBRO DEL TRIBUNAL**



**ING. FRANCISCO SANTELLI.
MIEMBRO DEL TRIBUNAL**

RESUMEN

En el presente trabajo se desarrolla un modelo matemático de respuesta transiente, partiendo desde la elemental geometría unidimensional para luego pasar a la configuración bidimensional del problema y finalmente, llegar a la geometría tridimensional real del sistema.

Se realiza el análisis mediante diferencias finitas, subdividiendo el horno en un cierto número de secciones cada una de las cuales, tiene un volumen pequeño de material llamados nodos.

El modelaje se realiza utilizando el método explícito o de avance hacia adelante en el tiempo. Fijando este y variando las posiciones para establecer la temperatura de los diferentes nodos.

Se presentan los programas y resultados para cada caso. Se muestran los gráficos representativos del comportamiento del proceso.

Se sacó resultados para diferentes consumos de combustible registrándose su influencia en estos.

Finalmente se emiten conclusiones y recomendaciones en base a los resultados obtenidos.

Los programas se desarrollan en Basic se los ha realizado en las micro-computadoras IBM del CICYT.

INDICE GENERAL

	<u>PAGS.</u>
RESUMEN	UI
INDICE GENERAL	UII
SIMBOLOGIA	IX
INTRODUCCION	12
I ASPECTOS TECNICOS	14
1.1 Descripción del problema	14
1.2 Objetivos	15
1.3 Alcance	16
II ESTUDIOS PRELIMINARES	17
2.1 Ladrillo: características y propiedades	17
2.2 Proceso de horneado	27
2.3 Tipo de hornos	28
III ESTUDIO DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR EN EL HORNO .	37
3.1 Procesos involucrados	37
3.2 Tratamiento de los procesos	39
IV TRATAMIENTO NUMERICO	45
4.1 Descripción del método utilizado	45
4.2 Limitaciones del método	49
4.3 Modelo matemático	50

V	SOLUCION NUMERICA	53
	5.1 Tratamiento unidimensional	53
	5.2 Tratamiento bidimensional	64
	5.3 Tratamiento tridimensional	73
VI	PRESENTACION DE RESULTADOS	90
	6.1 Solución unidimensional	90
	6.2 Solución bidimensional	103
	6.3 Solución tridimensional	112
VII	ANALISIS DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES	126
	APENDICES	130
	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	166

SIMBOLOGIA

A:	Area
AA:	Area que ha ganado calor a través del gas
AX:	Espaciamento entre nodos
AQ:	Espaciamento de tiempo
AL:	Difusividad térmica
AR:	Area expuesta a radiación
AR:	Area de radiación
B:	Número de Biot para el ambiente
BA:	Número de Biot para interior (convección y radiación)
CP:	Calor específico del ladrillo
CPG:	Calor específico del gas
E:	Emissividad del gas
F:	Factor de forma
FO:	Número de Fourier
H:	Coefficiente convectivo exterior
HC:	Coefficiente convectivo interior en la boca del horno
HA:	Coefficiente radiativo interior de la boca del horno
I:	Contador nodal en el eje X
J:	Indicador de tiempo actual
K:	Conductividad térmica
L:	Contador nodal en el eje Y

N:	Número de rodajas en la dirección Y
N(500):	Vector que almacena el valor de la temp. del gas
NAC:	Relación aire-combustible real
NC:	consumo de combustible
N	Número de rodajas en la dirección X
O:	Absortividad de la arcilla.
P:	Rodajas en la dirección Z
P1:	Longitud de la llama en la dirección Z
P2:	Longitud de la pared que ha recibido calor del gas
PCI:	Poder calorífico inferior del combustible
PR:	Densidad de la arcilla
PT:	Porcentaje de pérdidas por ineficiencia de combustión
Q:	Contador nodal en la dirección Z
q:	Razón de generación de calor
QR:	Calor por radiación que entra a los nodos
QT(Q):	Vector del calor radiado para cada nodo
QT(I,P):	Matriz del calor por radiación total en Z
R:	Número de nodos de la boca del horno en la dirección Y
S:	Número de nodos de la boca del horno en la dirección X
SUM:	Suma de temperatura de los nodos expuestos a radiación
T(I,J):	Matriz de temperaturas nodales para el tiempo actual
T(I,L,J):	Matriz de temperaturas nodales para el tiempo actual
T(I,L,Q,J):	Matriz de temperaturas nodales para el tiempo actual
TINIC:	Temperatura de la pared a tiempo cero
TG:	Temperatura del gas
TGSPP:	Temperatura del gas sin presencia de la pared
TT:	Término en las ecuaciones nodales
TH:	Temperatura de la pared dividida para 100

HI

TW(P):	Vector temperatura promedio de la pared en Z
U:	Término dependiente de la temperatura del gas
v:	Volumén para la generación de calor
U:	Término independiente en la ecuación de temp. del gas
W:	Contador de nodos expuestas a la llama
X:	Dimensión de el horno en la dirección X
XI:	Dimensión de la boca del horno en la dirección X
X(P):	Vector temperatura promedio de la pared en Z
XJ:	Contador de tiempo total
XX:	Contador de tiempo para impresión
Y:	Dimensión de el horno en la dirección Y
YI:	Dimensión de la boca del horno en al dirección Y
YX:	Contador de tiempo total
YA:	Término dependiente de temp. gas (Recalculado)
Z:	Dimensión de el horno en la dirección Z
ZA:	Temperatura del gas dividida para 100
δ :	Constante de Stefan-Boltzmann

INTRODUCCION

La producción de ladrillos, en nuestro País, se realiza siguiendo métodos transmitidos de generación en generación. La producción de estas ladrilleras es baja, existiendo un consumo excesivo de combustible (carbón o madera), que son obtenidos de la naturaleza; dando lugar a problemas de deforestación que amenaza el equilibrio ecológico de las zonas ladrilleras.

Los hornos usados tradicionalmente son tipo paredes desmontables u hormigueros estos hornos se arman para la cocción y se desmontan para extraer el producto una vez culminado el proceso. La carga de ladrillos crudos se apila sobre la fuente de calor que se ubica en las cámaras de combustión o bocas del horno.

La eficiencia de estas ladrilleras es baja, pues no toda la carga alcanza la temperatura de cocción desechándose las capas exteriores que son los más fríos (6).

En la Escuela Superior Politécnica del Litoral, el Centro Experimental de Tecnología Energética (CETE), se ha interesado en investigar el proceso de fabricación de los ladrillos para, mediante la introducción de técnicas apropiadas contribuir en el desarrollo de los sectores ladrilleros. Como parte del proceso de investigación se construyó en la comuna de Valdivia un horno de

paredes fijas para la producción de 3000 ladrillos el cual utiliza diesel como combustible. Se presenta la necesidad de analizar fenómenos y parámetros que influyen en el proceso para mediante el estudio de estos, llegar a establecer pautas de operación y funcionamiento de estos hornos, para mejorar su producción.

Planteado este tema para ser desarrollado como Tópico de Graduación y considerando la falta de investigación en este campo, se ve la necesidad de realizar un trabajo que sirva de base a estudios posteriores.

CAPITULO I

ASPECTOS TECNICOS

1.1 DESCRIPCION DEL PROBLEMA +

El modelar la transferencia de calor en un horno ladrillero es un problema complejo, pues son muchos los fenómenos que ocurren.

En el proceso, el calor es entregado por el combustible al ser quemado en las cámaras de combustión o bocas del horno.

El calor se transmite por efecto combinado de convección y radiación hacia la primera capa de ladrillos vistos por la llama.

Dentro de la carga los gases calientes provenientes de la combustión transmiten calor por convección y radiación, así como también, por conducción de los ladrillos en contacto físico entre sí.

Dentro de la carga los ladrillos van ganando temperatura a medida que transcurre el tiempo, acumulándose calor en ellos.

El horno está constituido de paredes compuestas y debido a su considerable espesor acumulan calor.

La mezcla para moldear los ladrillos contiene en su composición aserrín el que en el proceso de cocción se combustiona dando como resultado generación de calor.

cuando se arma la pila, se llenan los espacios vacíos con aserrín o con carbón, para de esta forma acelerar el proceso debido a la generación interna de calor por la combustión de estos elementos.

La superficie exterior del horno interactúa con el medio circundante intercambiando calor por convección y radiación.

El comportamiento del horno es tridimensional debido a la presencia de las cámaras de combustión.

1.2 OBJETIVOS

Modelar la transferencia de calor considerando conducción pura en la carga de ladrillos.

Establecer la variación de la temperatura del gas durante el proceso.

Modelar el problema en tres direcciones.

L 1.3 ALCANCE *condiciones -*

En este t3pico, se realiza el estudio puramente conductivo de la transferencia de calor en un horno ladrillero. Se modela la conducci3n dentro de la pila y, la variaci3n de la temperatura del gas con el tiempo y con la posici3n. Se considera la convecci3n y la radiaci3n en la superficie expuesta a la llama del quemador de diesel; dej3ndose para estudios posteriores la introducci3n de los fen3menos de convecci3n radiaci3n y generaci3n interna de calor dentro de la carga de ladrillos.

CAPITULO II

ESTUDIOS PRELIMINARES

TEORIA

2.1 LADRILLO: CARACTERISTICAS Y PROPIEDADES

En esta sección, se realiza un análisis comparativo de las propiedades entre el ladrillo de arcilla con aquellos de otros materiales de construcción.

La tabla 11.1, da los valores específicos para algunas de las propiedades discutidas abajo (6).

DUREZA.-La dureza a la compresión de los ladrillos de arcilla cocidos varia dependiendo del tipo de arcilla y del procesamiento.

Ladrillos de silicato de calcio, hechos a partir de arena con alto contenido de sílica o silicatos con baja proporción de magnesita y caliza, pueden tener dureza aproximada a los ladrillos de arcilla cocida.

Sin embargo, una maquinaria de alto costo se usa para el mezclado, prensado y calentado.

Ladrillos de concreto y bloque tienen suficiente dureza pero requieren cemento que es caro.

El concreto aireado tiene baja dureza, pero puede ser suficiente para construcciones de un piso. Un control de producción muy cuidadoso se necesita para reducir la contracción por pérdida de humedad de los bloques hechos a partir de este material. >

Muchos tipos de suelos tienen suficiente dureza de compresión cuando están secos. Sin embargo, esta se reduce considerablemente una vez que se satura con agua.

Para mejorar la dureza húmeda se usan materiales estabilizadores tales como, la caliza o cemento.

Yeso, el cual se obtiene como una roca dura o, en algunos lugares como una arena fina puede ser convertido a pasta por un calentamiento suave y luego mezclado con agregados finos y moldeados dentro de bloques de edificios. La humedad reducirá la dureza de compresión a un 50% del valor seco.

Los ladrillos están al tope de la lista de dureza especialmente cuando están húmedos.

Existen otros sistemas para construir paredes, tales como paredes de plantas maderables, o manufacturadas a partir de cemento, plástico o, metal. Sin embargo, la dureza de estas paredes influirán en gran medida sobre el marco construido para sostenerlas (6).

TABLA 11.1

RANGO DE PROPIEDADES PARA LADRILLO Y BLOQUE

PROPIEDAD	LADRILLO DE ARCILLA	LADRILLO DE SILICATO DE CALCIO	BLOQUE DE CONCRETO DENSO	BLOQUE DE CONCRETO ALIGERO	BLOQUE DE CONCRETO LIGERO	BLOQUE DE CONCRETO ESTABIL.
RESISTENCIA A LA COMPRESION (MN/M ²)	10 a 60	10 a 55	7 a 50	2 a 6	2 a 20	1 a 40
MOVIMIENTO REVERSIBLE DE HUMEDAD (% LINEAL)	0 a .02	.01 a .035	.02 a .05	.05 a .1	.04 a .08	.02 a .2
DENSIDAD (KG/M ³)	1.4 a 2.4	1.6 a 2.1	1.7 a 2.2	.4 a .9	.6 a 1.6	1.5 a 1.9
CONDUCTI- VIDAD TERMICA (H/M°C)	.7 a 1.3	1.1 a 1.6	1 a 1.7	.1 a .2	.15 a .7	.5 a .7

TRANSCRITO DE LA REFERENCIA 6.

MOVIMIENTO DE LA HUMEDAD.-La mayor parte de los materiales porosos se expanden cuando están húmedos y se contraen cuando se secan. Movimientos excesivos pueden causar resquebrajamiento u otra falla en los edificios. Esta expansión reversible es muy pequeña en los ladrillos de arcilla cocida. Sin embargo, una lenta expansión reversible se inicia en cuanto el ladrillo deja el horno. Esta puede variar desde cero hasta 0.1% del movimiento lineal. Bajo circunstancias normales la mayor parte la expansión tendrá lugar antes de que los ladrillos sean utilizados en construcciones. Así, la expansión remanente será insignificante.

Suelos de arcillas plásticas, pueden tener un movimiento de humedad grande de algunos puntos de porcentaje. Esta es una de la causa más comunes de falla en los edificios hechos de tierra. El problema se reduce al incorporar estabilizadores en el suelo. Madera, bambú presentan a veces movimientos grandes de humedad.

El movimiento de humedad es importante cuando varios materiales se juntan. Movimientos diferenciales incrementan la fuerza, que puede ser suficiente para romper el enlace entre los materiales. Por ejemplo, cuando se enlucen a menudo este se separa de las paredes y aparecen aberturas entre la estructura de cemento y materiales de relleno.

Los ladrillos, se comparan favorablemente con materiales de construcción alternativos. Las construcciones de ladrillo pueden ser hechas sin estructura de cemento, excluyendo de esta forma la probabilidad de movimiento diferencial (6).

TABLA 11.2

ESCALA DE PRODUCCION EN LA MANUFACTURACION DE LADRILLOS

ESCALA DE PRODUCCION	NUMERO PROMEDIO DE LADRILLOS POR DIA	PROCESO USADO	APROPIADO PARA AREA.
PEQUEÑA	1.000	HECHO MANUALMENTE HORNO CLAMP.	RURAL
MEDIANA	10.000	PROCESO MECANIZADO	CERCA A POBLADOS
GRANDE	100.000	PRODUCCION AUTOMATIZADA	INDUSTRIALIZADA ALTA DEMANDA Y GRAN INFRAESTR.

TRANSCRITO DE LA REFERENCIA 6.

⟨ **DENSIDAD Y PROPIEDADES TERMICAS.**-Los ladrillos, se ubican entre los materiales de construcción de mayor densidad. Esta es una desventaja para el transporte a distancias grandes y para las estructuras de edificios de múltiples pisos. Una alta densidad del ladrillo tiene la ventaja de su capacidad térmica alta con respecto a los materiales livianos. ⟩

Los materiales de concreto aireados y livianos son buenos aislantes térmicos, pero; carecen de capacidad térmica. Las paredes gruesas de lodo son más o menos buenos aislantes y presentan buena capacidad térmica. Los ladrillos son ventajosos por el bajo costo en las viviendas y por proporcionar mejores condiciones en los edificios.

⟨ **ESCALA DE PRODUCCION.**-La manufactura de ladrillos puede ser desarrollada a varias escalas dependiendo de las circunstancias locales. La tabla 11.2 resume las técnicas de producción a pequeña, mediana y gran escala de producción. ⟩

COCHURA Y CONTRACCION EN LA COCHURA

La humedad remanente de los ladrillos se remueve a temperaturas menores a 100°C . La naturaleza de la arcilla no cambia. La arcilla húmeda y fría conserva sus características iniciales.

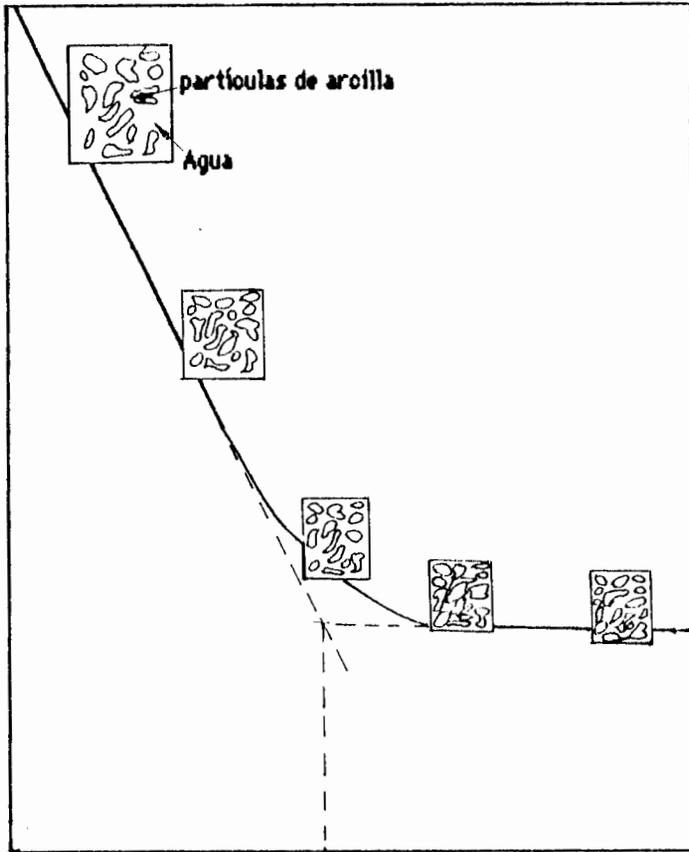
La primera reacción irreversible ocurre de 450 a 500°C que es, donde tiene lugar la deshidratación. Parte de la estructura de la arcilla real sale como vapor, dando lugar a

una expansión pequeña. De 400 a 700^oC el material orgánico derivados de plantas presentes en el suelo se carbonizan. Se ingresa aire en suficiente cantidad para convertir estos en dióxido de carbono. Si la materia orgánica no es completamente reaccionada antes de la temperatura de formación de los materiales vidriosos, los procesos de difusión no serán posible y el carbón permanecerá dentro de los ladrillos como un núcleo negro indeseable. Lo anterior puede ser causado por la carencia de oxígeno. Para facilitar la difusión del gas se puede mezclar un material de apertura tal como una arcilla refractaria.

A la temperatura donde se quema el material orgánico, los carbonatos presentes se descomponen expulsando dióxido de carbono y dióxido de azufre.

A los 573^oC la sílica cambia su forma cristalina en un proceso llamado inversión que produce una expansión. La velocidad de aumento de temperatura debe ser lenta para obtener una temperatura uniforme a través del ladrillo, evitando así esfuerzos excesivos que pueden impedir la formación de vidrio, La vitrificación es necesaria para enlazar las partículas y hacer el producto durable.

Mientras más alta la temperatura mayor cantidad de líquido se forma en el proceso de vitrificación y también mayor cantidad de material se contrae. En la práctica, el calentamiento debe ser restringido tanto a formar mucho líquido tal que los ladrillos comiencen a deformarse bajo el peso



Pérdida de agua

FIG. II.2: REDUCCION DE VOLUMEN.

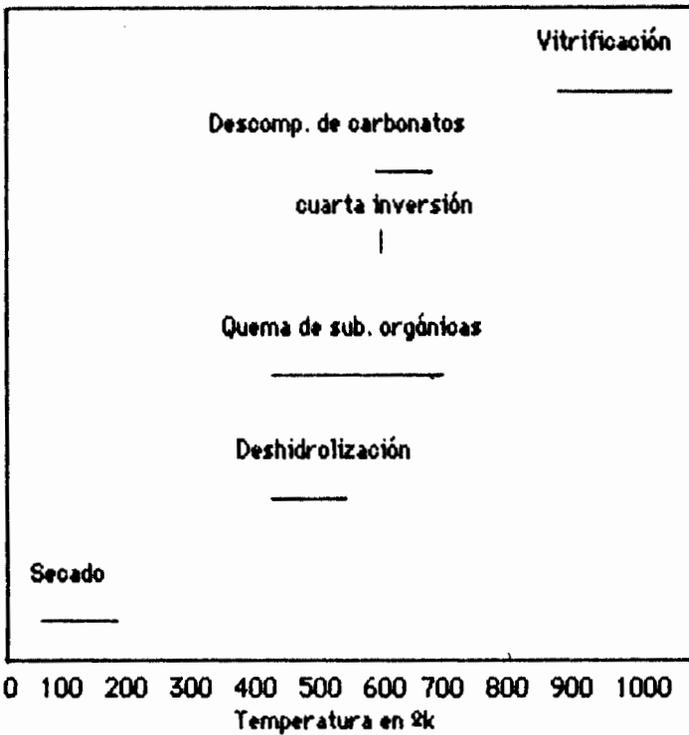


FIG. II.1: SECUENCIA DE LA COCHURA

de las capas más altas de ladrillos. En casos extremos los ladrillos se funden entre ellos. La formación de gas puede inflar las caras del ladrillo. En la figura 11.1 se muestra esquemáticamente los procesos que tienen lugar en la cochura de los ladrillos de acuerdo a la temperatura en que se encuentre (6).

REDUCCION DE VOLUMEN.-La reducción de volumen en el secado de materiales arcillosos es irreversible. La regla más importante es secar el ladrillo tan lento como sea posible para minimizar fuerzas y la incidencia de la deformación. Un 7 a 10% de reducción lineal puede ser aceptable con algunas arcillas si el secado es llevado cuidadosamente. Pueden reducirse los problemas disminuyendo la proporción de arcilla en la mezcla por la adición de arena. Se necesita que los ladrillos sean secados lentamente antes de ser ingresados al horno. La figura 11.2 muestra esquemáticamente la reducción de volumen de acuerdo a la pérdida de humedad del ladrillo (6).

OBJETIVOS DE LA COCHURA.- La cochura del ladrillo cambia su estructura física y da buenas propiedades mecánicas y de resistencia al ablandamiento por el agua. Una cochura apropiada reduce la ocurrencia de los siguientes problemas:

- Deslizamiento del ladrillos, debido a la remoción incompleta de humedad antes de la cochura;
- Baja dureza del ladrillo, debido a una cochura insuficiente;

- Ablandamiento por agua, debido a un control inadecuado de la temperatura;
- Ladrillos pegados , derretidos sobre una cara o deformados por la carga impuesta por los ladrillos ubicados encima; estos problemas se deben a una temperatura muy alta;
- Variedad de los tamaños del ladrillo cocido a pesar que crudos fueron del mismo tamaño; esto se debe a la no uniforme distribución de temperatura dentro del horno.
- Rompimiento fino sobre las superficies del ladrillo resultante de un cambio demasiado rápido en el calentamiento o, en el enfriamiento o por la condensación de los vapores de agua ;
- El rompimiento localizado sobre grumos duros o piedras mezcladas en la arcilla. Estas inclusiones deben ser removidas durante la preparación de la arcilla. El problema se agrava con los cambios rápidos de temperatura;
- Núcleos negros en los ladrillos. Estos no tienen un mal aspecto se deben a la presencia de carbón. Sin embargo, deberían ser quemados como un combustible que contribuye con la reducción de costos. Existen núcleos ferrosos que pueden eliminarse proveyendo suficiente oxígeno. Esto se consigue dejando suficientes vías para el flujo de aire entre los ladrillos y a través del horno;
- Las fisuras aparecen en la superficie del ladrillo como un resultado de la presencia de gases, producidos después que

la vitrificación ha comenzado; Manteniendo la temperatura estable. El problema puede evitarse incluyendo un material de abertura en la arcilla;

- Quema de caliza; este problema puede resolverse por remoción o, molienda de las piezas de piedra caliza o en algunos casos por adición de sal. La caliza movediza formada en el interior del ladrillo puede ser transformada por calentamiento a 1110°C (6).

* 2.2 PROCESO DE HORNEADO *

Es recomendable que se aplique primero poco calor a los ladrillos crudos para eliminar cualquier humedad residual. Este debe continuar hasta que se libere todo el vapor atrapado. Esta parte del calentamiento es conocida como humeado del agua. Para ver si se ha completado este calentamiento se inserta una barra de hierro frío dentro de un espacio dejado entre los ladrillos, retirándolo después de pocos segundos; Si existe condensación sobre la barra se tiene aun vapor atrapado y el calentamiento lento debe continuar hasta que no exista condensación.

Una vez que el humeado de agua haya completado. Una velocidad del aumento de temperatura de 50°C por hora es seguro en hornos controlados. En hornos más simples la velocidad de calentamiento debe ser más lenta ya que se carece de control de temperatura y por la imposibilidad de obtener suficiente combustible en algunos diseños de hornos. A pesar que una

velocidad más lenta de calentamiento es más segura, mayores velocidades involucran menor tiempo de calentamiento, menores pérdidas de calor y por lo tanto costos más bajos. La velocidad óptima de calentamiento es aquella que requiere régimen más corto de calentamiento. Mientras que, produce un producto de calidad satisfactoria. Un máximo de dos semanas puede ser necesario para el proceso completo de cocción.

Temperaturas máximas con poco aire pueden ser mantenidas durante algunas horas, con una pobre distribución de calor para asegurar un rendimiento máximo de ladrillos de buena calidad. Durante este estado conocido como estado de remojo, la difusión de calor a través del horno, varias reacciones químicas tienen lugar y material vidrioso se forma. Una vez que el remojo se completa, la fuente de calor puede ser removida.

La velocidad de enfriamiento no debería ser demasiado rápida, En la práctica, enfriamiento natural en el interior de la gran masa de ladrillo con un flujo de aire limitado, es satisfactorio. El enfriamiento puede llevar una semana completa. Para hornos grandes se puede introducir más aire una vez que se ha logrado temperaturas más bajas.

2.3 TIPOS DE HORNOS

Hay una gran variedad de tipos de hornos y tamaños. Estos pueden ser divididos en dos grupos. los hornos intermitentes y los continuos (6).

HORNOS INTERMITENTES.- Son llenados con ladrillos crudos,

los que son primeramente calentados a una temperatura máxima y luego enfriados antes de ser retirados del horno. Así, la estructura del horno se calienta en el proceso por lo que, todo el calor en los ladrillos y el horno se pierde a la atmósfera durante el enfriamiento. Los hornos intermitentes se adaptan a las demandas cambiantes del mercado. Pero no son los más eficientes energéticamente. ✓

↳ **HORNOS CONTINUOS.**- Estos tienen el fuego encendido en alguna parte de ellos todo el tiempo. Los ladrillos son removidos continuamente y remplazado por ladrillos crudos en otra parte del horno los cuales son calentados. La velocidad de producción es aproximadamente constante. Hornos continuos utilizan calor a partir de los ladrillos de enfriamiento para precalentar los ladrillos crudos y el aire de combustión para secar los ladrillos antes de que sean puestos dentro del horno, por lo que, son económicos en el uso de combustible. }

↳ **HORNO CLAMP**

Es el tipo de horno más elemental, no se construye ninguna estructura de horno permanente. consiste esencialmente de una pila de ladrillos crudos entre mezclado con material combustible. Es posible usar una variedad de material de desecho quemables en arcilla de ladrillo (ejemplo basura tamizada, coque en pequeñas partículas, polvo de carbón con cenizas), En países donde se produce madera, grandes cantidades de aserrín se mezclan con arcilla antes de la cochura.

Esto reducirá el gasto de combustible principal para el quemado de ladrillo. Los materiales de desecho deben ser pequeños y no exceder en peso de 5 a 10% de la mezcla total. De otra manera la arcilla se haría muy difícil de moldear o el producto final podría ser muy débil y demasiado poroso. El material combustible adicionado debe estar mezclado completamente con la arcilla.

Combustible en forma de coque o carbón pequeño es esparcido cubriendo el último con una capa de por lo menos unos 20 cm de espesor.

El horno es construido de aproximadamente 28 capas de ladrillo. Sus lados están inclinados por estabilidad. Se hacen tres o cuatro huecos en la base de una de las paredes para permitir la ignición inicial del lecho de combustible. Ladrillos cocidos son puestos contra los lados inclinados del horno para proveer aislamiento. Durante el quemado calor sube a través de las capas de ladrillos, exhala gases y algunas veces humo saliendo por el tope del horno. La velocidad de quemado no es fácil de controlar y depende de algunos factores, incluyendo la fuerza y dirección del viento. La ventilación y la velocidad de quemado puede ser controlada en alguna medida cubriendo el tope de el horno con ladrillo quemado.

Es deseable que el fuego avance a una velocidad constante. Los ladrillos cercanos a las orillas del horno tenderan a estar menos cocidos debido a pérdidas de calor más altas. Esto puede ser parcialmente rectificado poniendo un poco más

de combustible cerca de los bordes o a los lados del horno clamp. Combustible extra puede ser también esparcido entre los ladrillos del tope durante la cocción.

El proceso de cochura es indicado por el hundimiento del tope del horno. Una vez que el fuego a pasado un punto particular los ladrillos empiezan a enfriarse y pueden ser retirados, clasificados y vendidos.

Si suficiente aire fluye a través de los ladrillos durante la cochura, los procesos de oxidación daran un color rojo. Cuando el aire es escaso en condiciones de reducción debido a los gases a partir de combustible quemado se producirán ladrillos amarillos o anaranjados, especialmente si una arcilla de caliza se usa para el moldeo. Variaciones de color se tendran incluso en un solo lado del ladrillo. Como el combustible está en contacto cercano con los ladrillos crudos la eficiencia del combustible de un horno clamp grande de 100.000 a 1 millón de ladrillos puede ser alta. (ejemplo: al rededor de 7000 MJ por 1000 ladrillos).

Los ladrillos cercanos al centro del horno clamp serán los más duros. 20% de los ladrillos no podrían aun ser vendibles. Muchos de estos rechazados pueden ser puestos dentro del siguiente horno para recocción.

* HORNO ENLUCIDO

Este horno es una adaptación del anterior, se usa si el combustible disponible es del tipo de los que no pueden ser

esparcidos como un lecho fino en la base del horno o no existe en suficiente cantidad para quemar el ladrillo sin la alimentación continua. Se construyen túneles a través de la base de las pilas para alimentar el combustible adicional. Este es un método de operación de quema de madera en las ladrilleras de pequeña escala en países en desarrollo. Usualmente, la superficie exterior de los ladrillos apilados es enlucida. 

La construcción de este horno requiere de un nivel de arena o tierra seca, ladrillos previamente horneados si hay disponibles se colocan en la cama mirando hacia abajo. 3 0 4 capas de ladrillos se usarán para formar el fondo del tunel. El ancho de cada tunel es aproximadamente igual a dos largos del ladrillo. Tres largos de ladrillo separan los tuneles. Vias alternadas son puestas en ángulo recto del uno al otro. Para un número grande de ladrillos los túneles no pueden ser más largos de 6 metros. De otra manera el combustible insertado desde ambos lados no alcanzará el centro del tunel. grandes números de ladrillos son cocidos aumentando el número de túneles para cumplir con el requerimiento energético. La figura 11.3 ilustra la construcción de un horno de este tipo.

Los ladrillos crudos se ponen sobre el nivel del túnel en filas alternadas y se alargan hasta una altura de 3 metros sobre el nivel del suelo. En el borde del horno, cada fila es escalonada en un centímetro para dar una pendiente. Pequeños espacios se dejan entre los ladrillos para permitir

que los gases calientes que vienen del fuego se eleven.

El espacio máximo requerido entre los ladrillos es un dedo de ancho. A medida que el horno es armado, una capa exterior de ladrillos previamente quemados se coloca para proveer aislamiento. Esto también permite la cocción apropiada de la capa exterior de ladrillos crudos.

Se deben poner en el tope de los ladrillos crudos, dos o tres filas de ladrillos previamente cocidos. Se empasta con lodo húmedo para sellar las ranuras. Materiales aislantes se ponen algunas veces sobre el tope para reducir pérdidas de calor. El lodo húmedo no debe tener mucha arcilla para evitar el resquebrajamiento. Los ladrillos ubicados en el intermedio entre los túneles no se empastan por que ellos deben ser sacados para incrementar el flujo de aire dentro del horno cuando sea requerido.

Leña es ubicada dentro de los túneles en la boca y en el fondo del túnel ya que el calor del fuego debe elevarse entre los ladrillos. Es esencial que no soplen vientos fuertes dentro de los túneles enfriando los ladrillos y desperdiciando calor. Estos vientos pueden incrementar el consumo de energía en un 25%. Para evitar esto se bloquea el centro del túnel durante su construcción o se realiza el bloqueo temporal de la boca del túnel con ladrillos. En este caso, un lado puede ser ladrillado y ubicar fuego en el otro lado. Una vez que el fuego está bien encendido aquel lado puede ser ladrillado mientras, que el otro es abierto y encendido. El calor debe ser suave al principio hasta que

toda el agua en los ladrillos haya sido retirada. Un flujo adecuado de aire es esencial para remover el vapor producido. Así, las aberturas deben estar libres y el fuego mantenido tan bajo como el vapor se libera.

El período de humeo de agua puede durar varios días. Una vez que este se completa el fuego puede ser vigorizado gradualmente para incrementar la temperatura a un máximo en pocos días. Las aberturas se deben cerrar con ladrillos horneados antes de que la temperatura máxima se alcance para regular la velocidad de quemado y así ayudar a que sea uniforme la temperatura entre los ladrillos. El mantener estas temperaturas por algunas horas requiere una última carga de combustible y el sellado de las aberturas con lodo.

Este horno se deja que se enfríe al ambiente por tres o cuatro días. Luego algunos ladrillos de la parte exterior pueden ser removidos para acelerar el enfriamiento. Los ladrillos que no se han cocido completamente pueden ser incorporados en el siguiente horno.

El combustible comúnmente usado es la madera, otros combustibles como petróleo, carbón mineral son también usados. El carbón requiere una reja especial a cada lado de la boca del tunel y es más apropiado para cocción en hornos permanentes.

La eficiencia de combustible es baja en este tipo de horno, 16000 MJ se requieren para 1000 ladrillos.

Para incrementar la eficiencia térmica, el alto de los hor-

nos enlucidos debe ser tan grande como sea posible, mientras más largo, se tiene más ladrillos vendibles en el tope. >

> HORNOS SCOTCH <

> Es similar al anterior exacto por la base, los túneles de fuego y las paredes exteriores que son construidas con ladrillos puestos en mortero. El horno no tiene cubierta permanente, los ladrillos crudos se ponen en el interior del horno.

Se usa madera para la cocción a pesar que, rejillas de carbón o quemadores de petróleo son utilizados también.

La ventaja de este horno, sobre los otros de estructura permanente es su simple diseño y su erección fácil. La colocación y retiro de ladrillos es simple. >

> El consumo de energía es del orden de 16.000 MJ por 1.000 ladrillos.

Los hornos descritos son ampliamente usados en países en desarrollo. La falla principal es el calentamiento irregular y la gran proporción de ladrillos sobre quemados o con falta de cocción. Esto es especialmente cierto para arcillas con un rango lento de vitrificación pues, no pueden ser cocidos con un buen control de temperatura. >

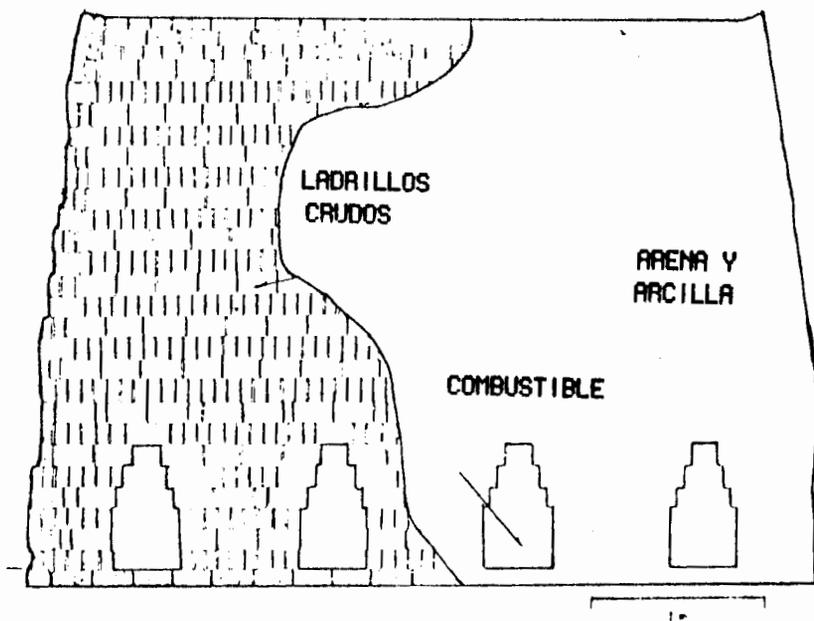
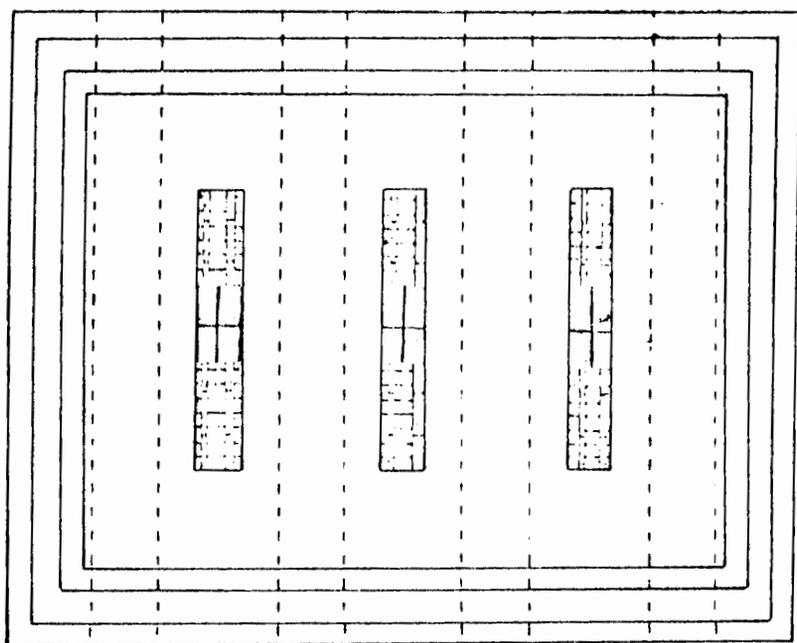


FIGURA 11.3: CONSTRUCCION DE UN HORNO ENLUCIDO

En este trabajo se considera al horno como un bloque sólido, sin paso interno de gases ni generación interna de calor por combustión de materia vegetal. El diagrama físico de este sistema se muestra en la

CAPITULO III

ESTUDIO DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR EN EL HORNO

3.1 PROCESOS INVOLUCRADOS

En un horno ladrillero tienen lugar los siguientes procesos:

- a.- Radiación de la llama y el gas a la pared expuesta a esta.
- b.- Convección del gas a la pared expuesta.
- c.- Conducción entre los ladrillos en contacto físico.
- d.- Convección y radiación desde el gas hacia los ladrillos en el interior de la carga.
- e.- Acumulación de calor en la masa de la carga y del horno.
- f.- Generación de energía interna en la carga.
- g.- Intercambio convectivo y radiativo de la superficie exterior del horno con el medio circundante.

NOTA: Debido a q nuestro nivel de estudio nos limita a analizar todos los procesos involucrados, solo nos concretaremos a los literales e y f.

En este trabajo se considera al horno como un bloque sólido, sin paso interno de gases ni generación interna de calor por combustión de materia vegetal. El diagrama físico de el sistema se muestra en la figura III.1.

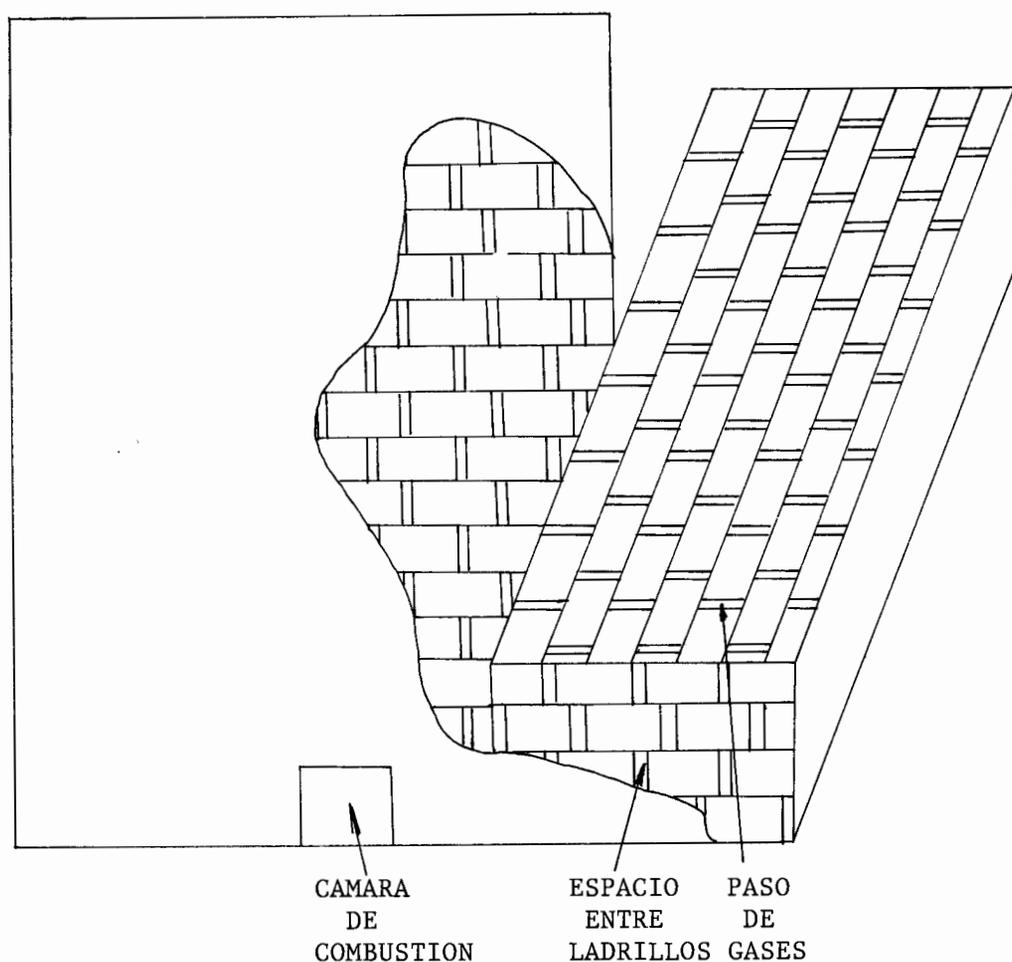


FIGURA III.1: DIAGRAMA FISICO DEL SISTEMA

Calor que entra = calor que genera + calor que sale + calor que acumula

3.2 TRATAMIENTO DE LOS PROCESOS

El tratamiento de los procesos que intervienen en la transferencia de calor en un horno ladrillero es complejo si se quiere incluir todos a la vez. En este trabajo se analiza la conducción en tres direcciones y se deja a investigaciones posteriores el adicionar los otros fenómenos.

El tratamiento general es el realizar un balance global de energía para la masa de ladrillo.

Dado que en un horno no se realiza ningún tipo de trabajo y considerando el volumen de control mostrado en la figura III.2, se tiene el balance de energía como sigue:

$$\begin{array}{cccc}
 \text{Calor} & \text{calor} & \text{calor} & \text{calor} \\
 \text{que} & \text{que} & \text{que} & \text{que} \\
 \text{entra} & \text{genera} & \text{sale} & \text{acumula}
 \end{array}
 \quad \dots(E3-1)$$

Q que entra = Q por conduc. + Q por convección + Q por radiación

Donde:

Q significa calor

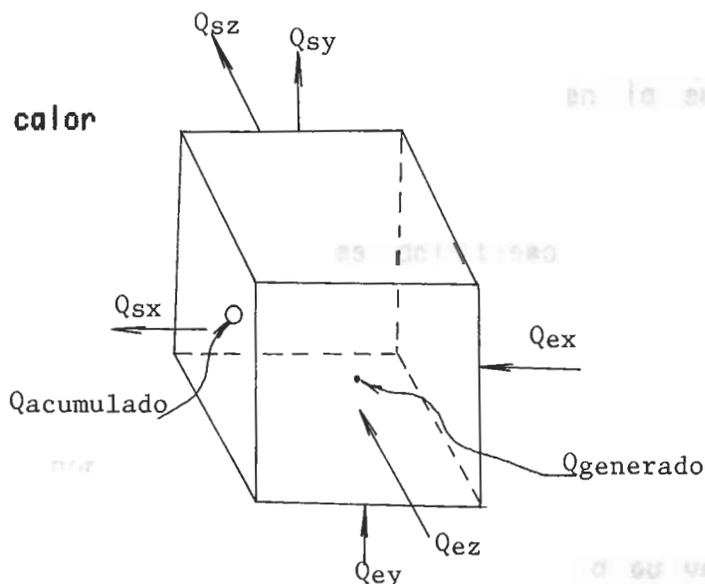


FIGURA III.2: VOLUMEN DE CONTROL

Tomando como base una geometría unidimensional para el análisis se tiene:

$$Q \text{ por radiación} = F \cdot \delta \cdot A (E \cdot (T_{(0,j-1)})^4 - 0 \cdot (T_{(x,j-1)})^4)$$

$$Q \text{ por convección} = A \cdot HC (T_{(0,j-1)} - T_{(x,j-1)})$$

$$Q \text{ por conducción} = K \cdot A (T_{(x-1,j-1)} - T_{(x,j-1)}) / \Delta X$$

$$Q \text{ generado} = Q \cdot v$$

$$Q \text{ sale} = Q \text{ conducción.}$$

$$Q \text{ sale} = k \cdot A (T_{(x,j-1)} - T_{(x+1,j-1)}) / \Delta X$$

$$Q \text{ acumula} = PR \cdot CP \cdot R \cdot \Delta X (T_{(x,j)} - T_{(x,j-1)}) / \Delta t$$

Analizando los términos de las ecuaciones anteriores se tiene que en el proceso:

E es variable con la temperatura del gas.

Q es variable con el cambio de la temperatura en la superficie.

T_0 o $T_{(0,j-1)}$ varía con los avances del tiempo por ser función de la energía entregada por el combustible y de la energía transmitida a la pared.

$T_{(x,j-1)}$ es variable por las razones mencionadas arriba.

HC es función de las propiedades del gas y estas a su vez dependen de la temperatura de este, siendo también variable.

K es una propiedad del material y depende de su temperatura.

PR y CP son propiedades que dependen de la temperatura del material.

Es necesario llegar a un compromiso entre los diferentes términos para poder modelar la situación del horno manteniendo constante ciertos parámetros.

Se considera la radiación y convección del gas hacia los ladrillos expuestos directamente a la llama.

Se utiliza diesel como combustible y, se consideran sus

Se deja para estudios posteriores la convección y radiación dentro de la pila de ladrillos.

En una primera aproximación se fijan constantes la emisividad del gas y la absorptividad de la pared.

Las propiedades del material se consideran primeramente constantes con la temperatura y luego se hace variar la conductividad del material.

* CONSIDERACIONES *

Con las limitaciones anotadas se procede a modelar el problema, realizando las siguientes consideraciones:

1.- Se toma como modelo del horno una geometría rectangular con una boca central que atraviesa el horno en la dirección z. (profundidad), mostrado en la figura III.3.

2.- El desarrollo se lo ha realizado considerando la simetría en el plano $X=X/2$, por lo que la geometría usada en la resolución del problema se muestra en la figura III.4. (E3-2)

3.- Existe un quemador por cada abertura o boca, presentándose simetría también en el eje z. Se utiliza en el desarrollo la simetría en el plano $Z=0$.

4.- La ubicación de los nodos es en la superficie de la rodaja del eje de simetría y de los nodos exteriores debido a que estos son la mitad que la de los otros como se visualiza en la figura III.5.

5.- Se utiliza diesel como combustible y, se consideran sus propiedades en la evaluación.

6.- Se tomaron propiedades referenciales del ladrillo tales como el calor específico, la conductividad, la densidad y la absorptividad (3).

7.- Se considera la variación de la temperatura del gas y, para su evaluación se observa los siguientes aportes caloríficos al proceso:

7.1.- Existe un calor entregado por el combustible, así como, un calor que es ganado por la superficie de la carga vista por la llama y un calor necesario para calentar el aire que ingresa para la combustión.

7.2.- Existen pérdidas por ineficiencia de la combustión PT. Con lo antes anotado, un balance de energía para encontrar la temperatura del gas queda así:

$$\begin{array}{l} \text{Calor} \\ \text{entregado por} \\ \text{el combustible} \end{array} = \begin{array}{l} \text{calor} \\ \text{ganado por} \\ \text{la pared} \end{array} + \begin{array}{l} \text{calor} \\ \text{para calentar} \\ \text{el aire-gas} \end{array} \quad \dots(E3-2)$$

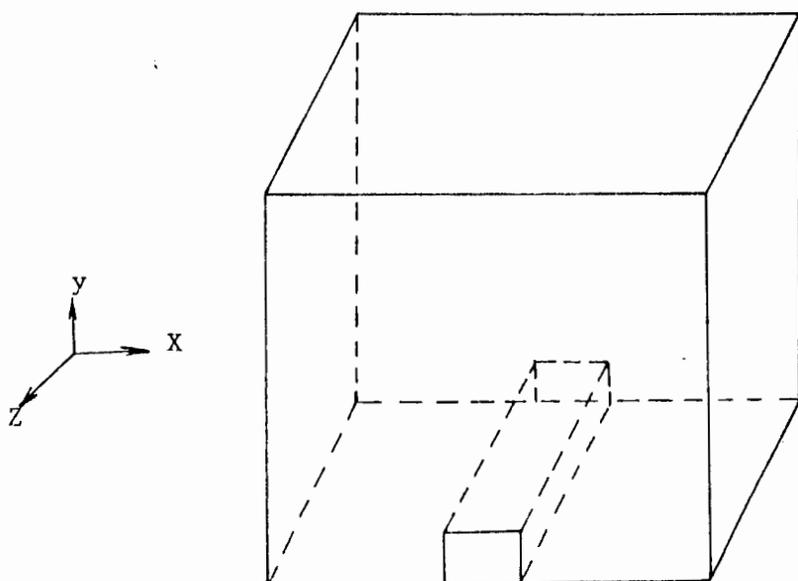


FIGURA III.3: ESQUEMA DEL MODELO DE HORNO ESTUDIADO

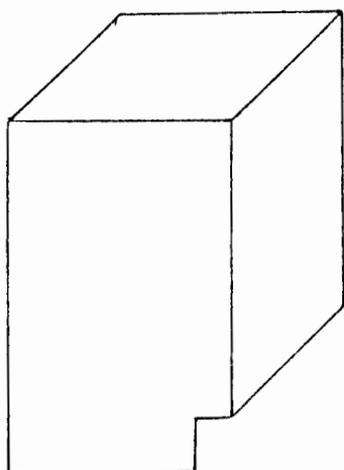


FIGURA III.4: GEOMETRIA UTILIZADA PARA EL MODELAJE

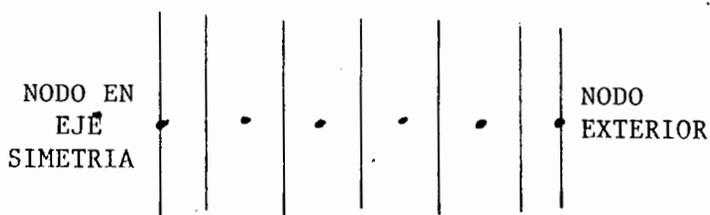


FIGURA III.5: UBICACION NODAL PARA EL MODELAJE

Calor entregado por el combustible = $PCI \cdot (1-PT) \cdot MC$.

Calor gana la pared = $\delta \cdot A \cdot [E \cdot (TG)^4 - O \cdot (TW)^4] + HC \cdot A \cdot [TG - TW]$

Calor para calentar el aire = $MC \cdot (MAC+1) \cdot CPG \cdot (TG - TO)$.

Reemplazando las expresiones anteriores en (E3-2), se tiene:

$$PCI \cdot (1-PT) \cdot MC = \delta \cdot F \cdot A \cdot (E \cdot TG^4 - O \cdot TW^4) + HC \cdot A \cdot (TG - TW) + MC \cdot (MAC+1) \cdot CPG \cdot (TG - TW).$$

Agrupando en U el valor de todos los términos independientes de TG y en U los que dependen del valor de la temperatura del gas se llega a:

$$U = PCI \cdot (1-PT) \cdot MC + \delta \cdot A \cdot F \cdot O \cdot TW^4 + HC \cdot A \cdot TW + MC \cdot (MAC+1) \cdot CPG \cdot TO$$

$$U = \delta \cdot F \cdot A \cdot E \cdot (TG)^4 + HC \cdot A \cdot TG + MC \cdot (MAC+1) \cdot CPG \cdot TG.$$

El valor de U se lo encuentra, evaluando para TW en el tiempo anterior. Una vez obtenido U se procede a evaluar U y encontrar la temperatura TG que haga a $U=U$.

Para tiempo igual a cero, se evalúa U con la temperatura inicial del horno que coincide con la temperatura ambiente.

Cuando el tiempo es mayor que cero, la temperatura del gas se la obtiene de la forma descrita y, los nodos ubicados en la pared expuesta a la llama tienen la temperatura según la ecuación desarrollada para ellos considerando su posición en la geometría del cuerpo, este desarrollo se muestra en el capítulo 4.

CAPITULO IV

TRATAMIENTO NUMERICO

4.1 DESCRIPCION DEL METODO UTILIZADO

El modelaje se realizó utilizando el método explícito. El enfoque numérico a los problemas de conducción en régimen transitorio se realiza usando diferencias finitas. El cuerpo se subdivide primeramente en un cierto número de secciones. En el centro de cada una de ellas se coloca un nodo ficticio para los nodos interiores y en la superficie para los nodos de frontera que tienen una sección igual a la mitad con respecto a los nodos interiores. Un balance de energía realizado en cada nodo dá como resultado una ecuación algebraica para la temperatura de cada nodo en función de la temperatura de los nodos vecinos y, de las propiedades geométricas y térmicas del cuerpo en cuestión. Un factor adicional que se considerará en un problema en régimen transitorio es la energía almacenada en el material representado por cada nodo. La energía almacenada se refleja como un aumento de energía interna del nodo y la propiedad termodinámica que regula la energía almacenada es el calor

específico (2).

Consideremos el caso más simple, un problema monodimensional en el que intervienen un nodo interior como se puede apreciar en la figura IV.1.

Puede escribirse una expresión de la conservación de la energía en el caso del nodo cero rodeado por los nodos 1 y 2 sin generación interna de calor.

$$\sum_{i=1}^2 q_i = \partial U_0 / \partial t \quad \dots (E4-1)$$

Donde:

U_0 es la energía interna del nodo.

q_i es el calor que llega o sale del nodo 0.

$$q_{1-0} + q_{2-0} = \partial U_0 / \partial t \quad \dots (E4-2)$$

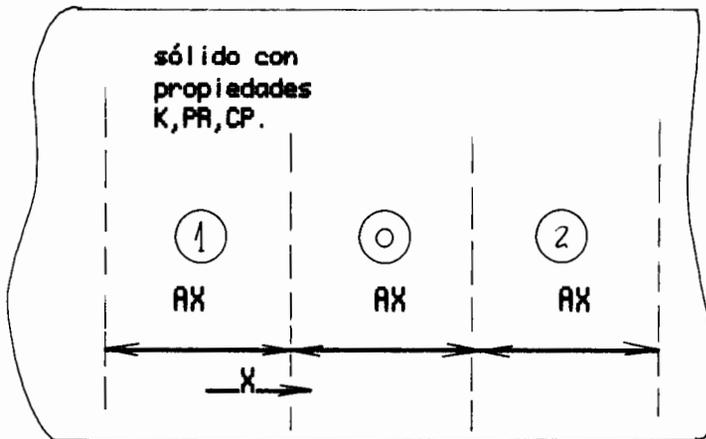


FIGURA IV.1: DISTRIBUCION DE LOS NODOS INTERIORES EN UN CUERPO SOLIDO.

Los términos de conducción pueden aproximarse mediante dife-

rencias finitas de la ley de Fourier.

$$\left. \begin{aligned} Q_{1-0} &= K \cdot A \cdot (T_{(1,J)} - T_{(0,J)}) / \Delta X \\ Q_{2-0} &= K \cdot A \cdot (T_{(2,J)} - T_{(0,J)}) / \Delta X \end{aligned} \right\} \dots (E4-3)$$

El subíndice J en estos términos se refieren al hecho de que las temperaturas deben calcularse en el instante J. Los subíndices 0,1,2 se refieren a la posición de los nodos a lo largo de X.

El aumento de energía interna para el material suponiendo densidad y calor específico constantes para el material, viene dado por:

$$\partial U_0 / \partial t = M \cdot C_P \cdot \Delta T_0 / \Delta Q = \rho \cdot A \cdot \Delta X \cdot C_P \cdot (T_{(0,J+1)} - T_{(0,J)}) / \Delta Q \quad \dots (E4-4)$$

Donde:

ΔQ es el tiempo transcurrido entre el tiempo J y el nuevo tiempo J+1.

Sustituyendo en la ecuación E4-2 se tiene:

$$K \cdot A \cdot \frac{(T_{(1,J)} - T_{(0,J)}) + (T_{(2,J)} - T_{(0,J)})}{\Delta X} = \rho \cdot A \cdot \Delta X \cdot C_P \cdot \frac{(T_{(0,J+1)} - T_{(0,J)})}{\Delta Q}$$

Despejando:

$$T_{(0,J+1)} = F_0 \cdot (T_{(1,J)} + T_{(2,J)}) + T_{(0,J)} \cdot [1 - 2 \cdot F_0] \quad \dots (E4-5)$$

Definiéndose el número de Fourier como:

$$FO = K \cdot A Q / (PR \cdot CP \cdot AX^2) \quad \dots (E4-6)$$

La difusividad térmica está definida por:

$$AL = K / (PR \cdot CP) \quad \dots (E4-7)$$

Para nodos en la frontera el balance de energía es:

$$q_{1-0} + q_{m-0} = \partial U_0 / \partial t \quad \dots (E4-8)$$

Reemplazando se tiene:

$$K \cdot A \frac{(T_{(1,J)} - T_{(0,J)})}{AX} + HC \cdot A (T_{(m,J)} - T_{(0,J)}) = PR \cdot A \cdot AX \cdot CP \frac{(T_{(0,J+1)} - T_{(0,J)})}{2 \cdot AX}$$

Despejando la temperatura del nodo superficial se tiene:

$$T_{(0,J+1)} = 2 \cdot FO (T_{(1,J)} + \beta \cdot T_{(m,J)}) + T_{(0,J)} \cdot [1 - 2 \cdot FO - 2 \cdot FO \cdot \beta] \dots (E4-9)$$

Definiéndose el número de Biot como:

$$\beta = HC \cdot AX / K \quad \dots (E4-10)$$

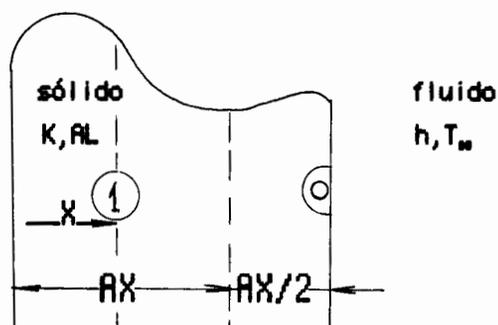


FIGURA IV.2: DISTRIBUCION NODAL PARA LA SUPERFICIE DEL CUERPO

El conocimiento de las temperaturas en un instante dado de la superficie del cuerpo y la temperatura del otro nodo que no esté en la superficie determina la temperatura del nodo superficial en el instante posterior.

Antes de poder resolver el problema, en régimen transitorio, de conducción mediante técnicas numéricas es necesario el conocimiento de la distribución de temperaturas iniciales. Se acostumbra dar la condición inicial considerando que el cuerpo está a una temperatura uniforme, es decir, es isoterma y de este modo basta con hacer que todas las temperaturas de todos los nodos sean iguales a la temperatura inicial conocida. Se continúa entonces la resolución numérica, cálculo de las temperaturas en el instante ΔQ posterior, mediante el empleo de la ecuación E4-5 para los nodos interiores y la ecuación E4-9 para el nodo superficial, si en el contorno se transfiere calor a un fluido a temperatura T_{∞} . conociendo las temperaturas en ΔQ se repite el proceso para calcular la distribución de temperatura completa en el instante $2\Delta Q$. Luego se sigue repitiendo el proceso hasta que se conozca la distribución de temperatura que se necesitaba.

4.2 LIMITACIONES DEL METODO

Parecería que la selección del espaciamiento entre nodos ΔX , como el intervalo de tiempo ΔQ está por completo a la elección del que realiza el cálculo. Sin embargo, ciertos valores de ΔX y ΔQ conducen a resultados que están en contradicción con los principios de la termodinámica (2).

La restricción del método se obtiene en base al término que contiene la temperatura del nodo en el instante anterior en las ecuaciones (E4-5) y (E4-9), este debe ser siempre un número positivo, por lo que, se establece una inecuación que al resolverla nos da los rangos para el valor de fourier.

La restricción del tamaño o valor del número de Fourier se denomina límite de estabilidad. Los nodos interiores tiene un límite de estabilidad diferente al nodo de frontera. Por tanto, el criterio debe cumplirse en los dos casos para que la solución sea estable.

El límite de estabilidad variará de acuerdo al problema particular que se este resolviendo numéricamente.

4.3 MODELO MATEMÁTICO

El modelo matemático presentado aquí es considerando la configuración unidimensional simple.

La temperatura del gas se obtiene a partir de la ecuación:

$$T_{G,n} = T_a + PCl * (1 - PT) / ((MAC + 1) * CPG) - QT / MC * (MAC + 1) * CPG \quad \dots (E4-11)$$

Donde QT es el calor transferido del gas a la pared y viene dado por:

$$QT_n = \delta * F * A * (E * T_G^4 - O * T_W^4) + HC * A * (T_G - T_W) \quad \dots (E4-12)$$

Resolviendo la ecuación E4-11 se obtiene la temperatura del gas para el tiempo actual tomando como temperatura de pared la del tiempo anterior. Se considera que a tiempo cero toda la energía entregada por el combustible se acumula en la pared y se obtiene la temperatura de la pared bajo esta consideración.

El coeficiente radiativo se calcula de la ecuación (E4-13).

$$HR = \delta * F * (E * TG^4 - 0 * TW^4) / (TG - TW) \quad \dots (E4-13)$$

La temperatura de la pared expuesta a la llama para tiempo cero es:

$$T_{(1,0)} = T_w + 2 * (TG - TW) * (HR + HC) * A_Q / (P_R * C_P * A_X) \quad \dots (E4-14)$$

Para los avances de tiempo se tiene:

El calor que entra por radiación a los nodos expuestos a la llama esta dado por:

$$Q_R = \delta * R * F * (E * T_{(0,j-1)}^4 - 0 * T_{(1,j-1)}^4) \quad \dots (E4-15)$$

$$HR = Q_R / (T_{(0,j-1)} - T_{(1,j-1)}) \quad \dots (E4-16)$$

El número de Biot para la cara expuesta a radiación y convección es:

$$BR = (HR + HC) * A_X / K \quad \dots (E4-17)$$

El área expuesta a radiación viene dada por:

$$AR=AX*1$$

El calor total que entra a la pared expuesta es:

$$QT=(HR+HC)*AR*(T_{(0,J-1)}-T_{(1,J-1)}) \dots (E4-18)$$

La temperatura del nodo 1 en el instante actual es:

$$T_{(1,J)}=FO*2*BA*T_{(0,J-1)}+T_{(1,J-1)}*(1-2*FO-2*FO*BA)+2*FO*T_{(2,J-1)} \dots (E4-19)$$

Para los nodos interiores la temperaturas en el tiempo J viene dada por:

$$T_{(1,J)}=2*FO*(T_{(1-1,J-1)}+T_{(1+1,J-1)})+T_{(1,J-1)}*(1-2*FO) \dots (E4-20)$$

Para el nodo de la frontera expuesta al medio circundante se tiene:

$$T_{(1,J)}=2*FO*BA*T_{(0,J-1)}+FO*2*T_{(1-1,J-1)}+T_{(1,J-1)}*(1-2*FO*BA-2*FO) \dots (E4-21)$$

Para los casos bi y tridimensional se realiza el mismo análisis con los balances de energía en cada nodo en función de las temperaturas del tiempo anterior.

CAPITULO V

SOLUCION NUMERICA

5.1 TRATAMIENTO UNIDIMENSIONAL

**MODELAJE DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR EN UN HORNO
CONSIDERANDO CONDUCTIVIDAD CONSTANTE.**

PROGRAMA "Q" ALGORITMO

El programa calcula la distribución de temperatura para una geometría unidimensional que recibe calor por radiación y convección por el un extremo y, pierde calor por convección al medio circundante por el otro.

1.- Primeramente se introducen las propiedades del combustible, propiedades del ladrillo, dimensiones del modelo usado, espaciamentos en tiempo y el espaciamento entre rodajas utilizadas para el cálculo.

2.- Se dimensionan las matrices a usar en este caso se tiene la matriz $T(N,1)$, donde se guardan los valores de las temperaturas para el tiempo anterior y el actual analizado y, un vector $M(500)$, que se utiliza para guardar los valores de las aproximaciones en el cálculo de la temperatura del gas.

3.- Con las condiciones de operación establecidas se calcula los números de Biot para el medio ambiente y Fourier. El número de Biot para el lado expuesto a la llama se calcula en cada avance de tiempo por cuanto es dependiente de la temperatura del gas y de la pared .

4.- El programa calcula la temperatura del gas para cada avance de tiempo. la ecuación para la temperatura del gas es de cuarto orden y se la resuelve por tanteo.

5.- Se calcula la temperatura de la pared expuesta a la llama a tiempo cero; Considerando que el calor transferido por el gas es captado en su totalidad por la superficie.

6.- Para los avances de tiempo se calculan las temperaturas de los nodos según las ecuaciones desarrolladas para cada caso y que se muestran en el capítulo 4 sección 4.3.

7.- El cálculo continua hasta que se cumpla la condición en tiempo de calentamiento o en temperatura alcanzada.

CODIFICACION

```

10 REM *****
11 REM *** ***
12 REM *** PROGRAMA Q ***
13 REM *** ***
14 REM *****
15 REM
30 REM *****
40 REM * ESTE PROGRAMA CALCULA LA DISTRIBUCION DE TEMPERATURA EN UN *
50 REM * HORNO EN EL QUE TIENEN LUGAR TRANSFERENCIA DE CALOR *
60 REM * EN ESTADO TRANSIENTE. SE CONSIDERA LA VARIACION DE LA *
70 REM * TEMPE.DEL GAS SE DESARROLLA EL PROGRAMA EN UNA DIRECCION *
74 REM *****
75 REM
90 INPUT"INGRESE LOS VALORES DE X,AX";X,AX
110 INPUT"INGRESE PROPIEDADES DEL COMB.CPI,CPG,E,MC";CPI,CPG,E,MC
120 INPUT"INGRESE PROPIEDADES DEL LADR.PR,CP,K,O,";PR,CP,K,O
121 INPUT"INGRESE EL ESPA.DE TIEMPO Y TEMP. AMB.";AQ,T0
122 F=.5
200 HC=10
220 MAC=19
230 PT=.3
240 H=5
270 N=X/AX
320 TW=T0/100
330 DIM T(N+3,1)
340 DIM M(500)
370 FOR I=0 TO N+1
380 T(I,J)=T0
390 NEXT I
420 AL=K/(PR*CP)
430 B=H*AX/K
440 F0=AL*AQ/AX^2
445 A=2.3*1
450 X=T0/100
460 J=-1
465 REM *****
470 REM * EMPIEZA LA ITERACION *
480 REM * SE INICIA EL AVANCE EN EL TIEMPO DESDE UN TIEMPO IGUAL *
490 REM * A CERO EN EL QUE LA PLACA SE ENCUENTRA A LA TEMPERATURA *
500 REM * AMBIENTE HASTA QUE SE CUMPLA AL CONDICION DESEADA *
505 REM *****
510 REM
610 J=J+1
620 V=PCI*(1-PT)*MC+T0*CPG*MC*(1+MAC)+5.67*A*F*(TW^4)*O+HC*A*100*TW
630 L=0
640 C=1
650 REM *****
670 REM * LOS VALORES DE LA TEMPERATURA DEL GAS SE OBTIENE MEDIANTE *
680 REM * METODO ITERATIVO *
690 REM *****
691 REM

```

```

692 REM *****
695 REM * EMPIEZA EL TANTEO *
696 REM *****
700     L=L+1
710     X=X+C
720     U=5.67*F*A*E*X^4+100*(CPG*(MAC+1)*MC+A*HC)*X
730     M(L)=ABS(V-U)
740     IF (V-U)>0 THEN GOTO 690
750     ZA=(M(L-1)*X+M(L)*(X-C))/(M(L-1)+M(L))
760     YA=5.67*F*A*E*ZA^4+100*(CPG*(MAC+1)*MC+A*HC)*ZA
840 REM
850     IF ABS(YA-V)<10 THEN GOTO 910
860     X=X-C
870     C=C/10
880     X=X-C
890     L=0
900     IF L=0 THEN GOTO 690
905 REM *****
910 REM * SE HA OBTENIDO LA TEMPERATURA DEL GAS *
915 REM *****
980     TG=ZA*100
1020    IF J>0 THEN GOTO 1230
1025    HR=5.67*F*(E*ZA^4-0*TW^4)/(100*(ZA-TW))
1040    T(0,J)=TG
1060 REM
1070    TINIC=T0+(HR+HC)*(100*ZA-T0)*AQ/(PR*CP*AX*5)
1080 REM
1140    T(1,0)=TINIC
1180    T(N+2,J)=(HR+HC)*(TG-TW*100)*A/((MAC+1)*MC*CPG)
1200    T(0,J)=TG
1218    TW=TINIC/100
1219    X=TW
1220    IF J=0 THEN GOTO 2500
1230    TG=ZA*100
1232    T(N+2,J)=HT*(TG-T(1,J))*A/((MAC+1)*MC*CPG)
1235    HR=5.67*F*(E*(T(0,J-1)/100)^4-0*TW^4)/(T(0,J-1)-100*TW)
1237    T(N+3,J)=AQ*YX/60
1240    BA=(HR+HC)*AX/K
1242    T(N+2,J)=(HR+HC)*(T(0,J-1)-T(1,J-1))*A/((MAC+1)*MC*CPG)
1245    T(0,J)=TG
1250 REM
1280 REM *****
1290 REM * CALCULO DEL NODO UBICADO EN AL SUPERFICIE VISTA POR LA*
1300 REM * LLAMA RECIBIENDO CONVECCION Y RADIACION *
1310 REM *****
1440     I=1
1442 REM *****
1450 REM * NODO 1 *
1500 REM *****
1600     TT=T(I+1,J-1)
1700     T(I,J)=F0*2*BA*T(0,J-1)+T(I,J-1)*(1-2*F0-2*F0*BA)+2*F0*TT
1800     TW=T(1,J)/100
1900     X=TW

```

```

1950 REM                      *****
1975 REM                      *  NODOS 2  *
2000 REM                      *****
2050          FOR I=2 TO N
2100              TT=T(I-1,J-1)+T(I+1,J-1)
2150              T(I,J)=F0*TT+T(I,J-1)*(1-2*F0)
2200          NEXT I
2250          I=N+1
2290 REM                      *****
2300 REM                      *  NODO 3  *
2350 REM                      *****
2400              TT=2*T(I-1,J-1)
2450              T(I,J)=2*F0*B*T0+F0*TT+T(I,J-1)*(1-2*F0*B-2*F0)
2500          YX=YX+1
2530 IF J=0 THEN GOTO 2560
2550          XX=XX+1
2555              IF XX<12 THEN GOTO 3975
2556          XX=0
2560              IF J>0 THEN GOTO 3750
2570          TGSP=300+PCI*(1-PT)/((MAC+1)*CPG)
2580 LPRINT"          RESULTADOS DEL CALENTAMIENTO DE LA PLACA PLANA"
2581 LPRINT" "
2582 LPRINT"          PARA UN ESPACIAMIENTO ENTRE NODOS =" ;AX
2583 LPRINT" CUANDO LOS INCREMENTOS DE TIEMPO EN MINUTOS ES=" ;AQ/60
2584 LPRINT"          SIENDO LAS PROPIEDADES DEL MATERIAL "
2585 LPRINT" "
2586 LPRINT"          CONDUCTIVIDAD DEL LADRILLO=" ;K
2587 LPRINT"          DENSIDAD DEL LADRILLO =" ;PR
2588 LPRINT"          CALOR ESPECIFICO EN J/KG~C=" ;CP
2589 LPRINT"          ABSORTIVIDAD DEL LADRILLO=" ;O
2590 LPRINT" "
2591 LPRINT" CUANDO EL COMBUSTIBLE Y EL GAS TIENEN COMO PROPIEDADES"
2595 LPRINT" "
2596 LPRINT" PODER CALORIFICO INFERIOR DEL COMBUSTIBLE EN J/KG=" ;PCI
2598 LPRINT"          EMISIVIDAD DEL GAS =" ;E
2599 LPRINT" RELACION AIRE COMBUSTIBLE EN LA COMBUSTION =" ;MAC ;
2600 LPRINT"- " ;1
2620 LPRINT"          FLUJO MASICO DE COMBUSTIBLE EN KG/S=" ;MC
2630 LPRINT" "
2631 LPRINT"          TG SIN PRESENCIA DE LA PARED EN ~K ES=" ;TGSP
2640 LPRINT" "
2700          FOR I=0 TO N+2
2725              IF I>N+1 THEN GOTO 2910
2730              IF I>0 THEN GOTO 2750
2740              LPRINT" TG " ;
2745              GOTO 3000
2750              LPRINT"NODO" ;I ;
2800              GOTO 3000
2910              LPRINT" TIMP" ;
3000          NEXT I:LPRINT
3200 LPRINT" "
3750          FOR I=0 TO N+3
3800              LPRINT USING"#####.#" ;T(I,J) ;

```

```
3850         NEXT I:LPRINT
3975     FOR I=0 TO N+3
3980         T(I,0)=T(I,J)
3985     NEXT I
3987     J=0
3999     IF T(N-3,J)<500 THEN GOTO 470
4000 END
```

MODELAJE DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR EN UN HORNO CONSIDERANDO CONDUCTIVIDAD VARIABLE CON LA TEMPERATURA.

PROGRAMA "QK" ALGORIGNO.

El programa calcula la distribución de temperatura en una geometría unidimensional que, recibe calor por radiación desde una llama y a la vez, intercambia calor por convección con los gases productos de la combustión del diesel y, por el otro extremo interactúa con el medio circundante perdiendo calor por convección y radiación .

En este programa se sigue el mismo procedimiento que en el programa Q en lo que respecta a dimensionar matrices, calcular la temperatura del gas.etc; La diferencia que existe entre este programa y el anterior es básicamente que aquí, calculamos para cada avance de tiempo y para cada nodo en particular su conductividad y los términos dependientes de ella como son la difusividad térmica, el número de Biot, número de Foulner, etc.

CODIFICACION

```

10 REM *****
11 REM *** ***
12 REM *** PROGRAMA QK ***
13 REM *** ***
14 REM *****
15 REM
30 REM *****
40 REM * ESTE PROGRAMA CALCULA LA DISTRIBUCION DE TEMPERATURA EN UN *
50 REM * HORNO EN EL QUE TIENE LUGAR TRANSFERENCIA DE CALOR *
60 REM * EN ESTADO TRANSIENTE. CUANDO LA CONDUCTIVIDAD ES VARIABLE *
70 REM * DESARROLLA EL PROGRAMA EN UNA DIRECCION *
71 * SE CONSIDERA LA VARIACION DE LA TEMPERATURA DEL GAS *
74 REM *****
75 REM
90 INPUT"INGRESE LOS VALORES DE X,AX";X,AX
110 INPUT"INGRESE PROPIEDADES DEL COMB.CPI,CPG,E,MC";CPI,CPG,E,MC
120 INPUT"INGRESE PROPIEDADES DEL LADR.PR,CP,O,";PR,CP,O
121 INPUT"INGRESE EL ESPA.DE TIEMPO Y TEMP. AMB.";AQ,T0
122 F=.5
200 HC=10
220 MAC=19
230 PT=.3
240 H=5
270 N=X/AX
320 TW=T0/100
330 DIM T(N+3,1)
340 DIM M(500)
370 FOR I=0 TO N+1
380 T(I,J)=T0
390 NEXT I
445 A=2.3*1
450 X=T0/100
460 J=-1
465 REM *****
470 REM * EMPIEZA LA ITERACION *
480 REM * SE INICIA EL AVANCE EN EL TIEMPO DESDE UN TIEMPO IGUAL *
490 REM * A CERO EN EL QUE LA PLACA SE ENCUENTRA A LA TEMPERATURA *
500 REM * AMBIENTE HASTA QUE SE CUMPLA AL CONDICION DESEADA *
505 REM *****
510 REM
610 J=J+1
620 V=PCI*(1-PT)*MC+T0*CPG*MC*(1+MAC)+5.67*A*F*(TW^4)*O+HC*A*100*TW
630 L=0
640 C=1
650 REM *****
670 REM * LOS VALORES DE LA TEMPERATURA DEL GAS SE OBTIENE MEDIANTE *
680 REM * METODO ITERATIVO *
690 REM *****
692 REM *****
695 REM * EMPIEZA EL TANTEO *
696 REM *****

```

```

700     L=L+1
710     X=X+C
720             U=5.67*F*A*E*X^4+100*(CPG*(MAC+1)*MC+A*HC)*X
730             M(L)=ABS(V-U)
740             IF (V-U)>0 THEN GOTO 690
750             ZA=(M(L-1)*X+M(L)*(X-C))/(M(L-1)+M(L))
760             YA=5.67*F*A*E*ZA^4+100*(CPG*(MAC+1)*MC+A*HC)*ZA
840 REM
850             IF ABS(YA-V)<10 THEN GOTO 910
860     X=X-C
870     C=C/10
880     X=X-C
890     L=0
900             IF L=0 THEN GOTO 690
905 REM     *****
910 REM     * SE HA OBTENIDO LA TEMPERATURA DEL GAS *
915 REM     *****
980     TG=ZA*100
1020            IF J>0 THEN GOTO 1230
1025            HR=5.67*F*(E*ZA^4-O*TW^4)/(100*(ZA-TW))
1040            T(0,J)=TG
1060 REM
1070            TINIC=T0+(HR+HC)*(100*ZA-T0)*AQ/(PR*CP*AX*5)
1080 REM
1140            T(1,0)=TINIC
1180            T(N+3,J)=(HR+HC)*(TG-TW*100)*A/((MAC+1)*MC*CPG)
1200            T(0,J)=TG
1218            TW=TINIC/100
1219            X=TW
1220            IF J=0 THEN GOTO 2500
1230            TG=ZA*100
1232            T(N+3,J)=HT*(TG-T(1,J))*A/((MAC+1)*MC*CPG)
1235            HR=5.67*F*(E*(T(0,J-1)/100)^4-O*TW^4)/(T(0,J-1)-100*TW)
1237            T(N+2,J)=AQ*YX/60
1240            BA=(HR+HC)*AX/K
1242            T(N+3,J)=(HR+HC)*(T(0,J-1)-T(1,J-1))*A/((MAC+1)*MC*CPG)
1245            T(0,J)=TG
1250 REM
1280 REM *****
1290 REM * CALCULO DEL NODO UBICADO EN AL SUPERFICIE VISTA POR LA*
1300 REM * LLAMA RECIBIENDO CONVECCION Y RADIACION *
1310 REM *****
1440     I=1
1442 REM     *****
1450 REM     * NODO 1 *
1500 REM     *****
1525     AL=K/(PR*CP)
1550     B=H*AX/K
1575     F0=AL*AQ/AX^2
1600     TT=T(I+1,J-1)
1700     T(I,J)=F0*2*BA*T(0,J-1)+T(I,J-1)*(1-2*F0-2*F0*BA)+2*F0*TT
1800     TW=T(1,J)/100
1900     X=TW

```

```

1950 REM                      *****
1975 REM                      * NODOS 2 *
2000 REM                      *****
2010     AL=K/(PR*CP)
2020     B=H*AX/K
2030     F0=AL*AQ/AX^2
2050     FOR I=2 TO N
2100         TT=T(I-1,J-1)+T(I+1,J-1)
2150         T(I,J)=F0*TT+T(I,J-1)*(1-2*F0)
2200     NEXT I
2250     I=N+1
2290 REM                      *****
2300 REM                      * NODO 3 *
2350 REM                      *****
2360     AL=K/(PR*CP)
2370     B=H*AX/K
2380     F0=AL*AQ/AX^2
2400         TT=2*T(I-1,J-1)
2450         T(I,J)=2*F0*B*TO+F0*TT+T(I,J-1)*(1-2*F0*B-2*F0)
2500     YX=YX+1
2530 IF J=0 THEN GOTO 2560
2550     XX=XX+1
2555     IF XX<8 THEN GOTO 3975
2556     XX=0
2560     IF J>0 THEN GOTO 3750
2570     TGSP=300+PCI*(1-PT)/((MAC+1)*CPG)
2580 LPRINT"      RESULTADOS DEL CALENTAMIENTO DE LA PLACA PLANA"
2581 LPRINT" "
2582 LPRINT"      PARA UN ESPACIAMIENTO ENTRE NODOS =" ;AX
2583 LPRINT"      CUANDO LOS INCREMENTOS DE TIEMPO EN MINUTOS ES=" ;AQ/60
2584 LPRINT"      SIENDO LAS PROPIEDADES DEL MATERIAL "
2585 LPRINT" "
2586 LPRINT"      CONDUCTIVIDAD DEL LADRILLO=" ;K
2587 LPRINT"      DENSIDAD DEL LADRILLO =" ;PR
2588 LPRINT"      CALOR ESPECIFICO EN J/KG~C=" ;CP
2589 LPRINT"      ABSORTIVIDAD DEL LADRILLO=" ;O
2590 LPRINT" "
2591 LPRINT"      CUANDO EL COMBUSTIBLE Y EL GAS TIENEN COMO PROPIEDADES"
2595 LPRINT" "
2596 LPRINT"      PODER CALORIFICO INFERIOR DEL COMBUSTIBLE EN J/KG=" ;PCI
2598 LPRINT"      EMISIVIDAD DEL GAS =" ;E
2599 LPRINT"      RELACION AIRE COMBUSTIBLE EN LA COMBUSTION =" ;MAC ;
2600 LPRINT"-";1
2620 LPRINT"      FLUJO MASICO DE COMBUSTIBLE EN KG/S=" ;MC
2625 LPRINT" "
2630 LPRINT"      TG SIN PRESENCIA DE PARED ES EN ~K =" ;TGSP
2630 LPRINT"TG SIN PRESENCIA DE PARED ES EN ~K =" ;TGSP
2640 LPRINT" "
2700     FOR I=0 TO N+2
2725     IF I>N+1 THEN GOTO 2910
2730     IF I>0 THEN GOTO 2750
2740     LPRINT" TG " ;
2745     GOTO 3000

```

```
2750             LPRINT"NODO";I;
2800             GOTO 3000
2910             LPRINT" TIMP";
3000             NEXT I:LPRINT
3200 LPRINT" "
3750             FOR I=0 TO N+3
3800                 LPRINT USING"#####.#";T(I,J);
3850             NEXT I:LPRINT
3975             FOR I=0 TO N+3
3980                 T(I,0)=T(I,J)
3985             NEXT I
3987             J=0
3999             IF T(N-3,J)<500 THEN GOTO 470
4000             END
```

5.2 TRATAMIENTO BIDIMENSIONAL

MODELAJE DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR EN UN HORNO CONSIDERANDO CONDUCTIVIDAD CONSTANTE.

PROGRAMA "QQ" ALGORITMO

Este programa, calcula la distribución de temperatura en un horno ladrillero en el que, tienen lugar los procesos de transferencia de calor en estado transiente.

Se utiliza una geometría bidimensional de forma rectangular con una boca o cámara de combustión en su centro a nivel del suelo.

La sección simétrica analizada tiene la distribución nodal mostrada en el programa codificado. A cada uno de los nodos numerados les corresponde una ecuación específica, de acuerdo a su balance de energía particular.

1.- Se dan los valores de las propiedades, dimensionamiento, etc.; igual que en el programa Q. Adicionalmente se tiene la dimensión de la cámara de combustión.

2.- Se dimensionan las matrices a utilizar en el cálculo así:

$T(N,M,1)$, Matriz donde se guardan los valores de las temperaturas en el tiempo actual y anterior para cada posición x,y de los nodos;

QT(S+R), Matriz que almacena el calor que entra a cada nodo expuesto a la llama en el tiempo actual;

N(500), Almacena el valor de tanteo en el cálculo de la temperatura del gas.

3.- Se calcula la temperatura del gas de la forma descrita en el programa Q.

4.- Para tiempo cero el programa calcula la temperatura de los nodos expuestos a la llama considerando que esta es uniforme.

5.- En los avances de tiempo, se tiene que el programa calcula la temperatura de todos los nodos, de acuerdo a la ecuación particular resultante del balance de energía del nodo en cuestión.

se prosigue el cálculo hasta que se cumpla la condición deseada.

CODIFICACION

```

10 REM *****
11 REM *** ***
12 REM *** PROGRAMA QQ ***
13 REM *** ***
14 REM *****
20 REM *****
40 REM * ESTE PROGRAMA CALCULA LA DISTRIBUCION DE TEMPERATURA EN *
50 REM * UN HORNO LADRILLERO EN EL QUE TIENEN LUGAR LOS PROCESOS DE *
60 REM * TRANSFERENCIA DE CALOR EN ESTADO TRANSIENTE. SE CONSIDERA *
70 REM * LA VARIACION DE LA TEMPERATURA DEL GAS Y, *
71 REM * SE REALIZA EL PROGRAMA EN DOS DIMENSIONES *
75 REM *****
80 J=0
90 INPUT"INGRESE LOS VALORES DE X,Y,Z,AX";X,Y,Z,AX
110 INPUT"INGRESE LOS VALORES DE X1,Y1";X1,Y1
111 INPUT"INGRESE PROPIEDADES DEL COMB.CPI,CPG,E,MC";CPI,CPG,E,MC
112 INPUT"INGRESE PROPIEDADES DEL LADR.PR,CP,K,O";PR,CP,K,O
113 INPUT"INGRESE ESPA. DE TIEMPO Y TEMP. AMB.";AQ,TO
115 XX=-1
200 HC=10
215 A=X1+Y1
220 MAC=19
225 F=.03*3.1416/A
230 PT=.3
240 H=5
270 N=X/AX
280 M=Y/AX
300 S=X1/AX
310 R=Y1/AX
320 TW=TO/100
325 YX=1
330 DIM T(N,M,1)
335 DIM QT(S+R)
340 DIM M(500)
360 FOR L=0 TO M
370 FOR I=0 TO N
380 T(I,L,J)=TO
390 NEXT I
400 NEXT L
420 AL=K/(PR*CP)
430 B=H*AX/K
440 FO=AQ*AL/AX^2
450 X=TO/100
460 J=-1
465 REM *****
470 REM * EMPIEZA LA ITERACION *
480 REM * SE INICIA EL AVANCE EN EL TIEMPO DESDE UN TIEMPO IGUAL *
490 REM * A CERO EN EL QUE EL HORNO SE ENCUENTRA A LA TEMPERATURA *
500 REM * AMBIENTE HASTA QUE SE CUMPLA AL CONDICION DESEADA *
501 REM *****
610 J=J+1

```

```

620 V=PCI*(1-PT)*MC+T0*CPG*MC*(1+MAC)+5.67*A*F*(TW^4)*O+HC*A*100*TW
630 L=0,C=1,SUM=0,W=0
665 REM *****
670 REM *   LOS VALORES DE LA TEMPERATURA DEL GAS SE OBTIENE   *
680 REM *           MEDIANTE METODO ITERATIVO                   *
681 REM *****
682 REM           *****
690 REM           *   EMPIEZA EL TANTEO   *
692 REM           *****
700 L=L+1
710 X=X+C
720 U=5.67*F*A*E*X^4+100*(CPG*(MAC+1)*MC+A*HC)*X
730 M(L)=ABS(V-U)
735 REM PRINT"EL VALOR DE L Y M(L)";L,M(L)
736 REM PRINT"EL VALOR DE V-U ES";(V-U)
740 IF (V-U)>0 THEN GOTO 690
750 ZA=(M(L-1)*X+M(L)*(X-C))/(M(L-1)+M(L))
760 YA=5.67*A*F*E*ZA^4+100*(CPG*(MAC+1)*MC+A*HC)*ZA
850 IF ABS(YA-V)<10 THEN GOTO 910
860 X=X-C
870 C=C/10
880 X=X-C
890 L=0
900 IF L=0 THEN GOTO 690
905 REM           *****
906 REM           *           SE HA OBTENIDO           *
910 REM           *           LA TEMPERATURA DEL GAS           *
911 REM           *****
930 HR=5.67*F*(E*ZA^4-O*TW^4)/(100*(ZA-TW))
950   FOR I=0 TO S-1
960     FOR L=0 TO R-1
980       T(I,L,J)=ZA*100
982     NEXT L
983   NEXT I
984 IF J>0 THEN GOTO 1230
985 LPRINT" "
986 LPRINT" RESULTADOS DEL CALENTAMIENTO BIDIMENSIONAL DE UN HORNO "
987 LPRINT" "
988 LPRINT"   PARA UN ESPACIAMIENTO ENTRE NODOS =" ;AX
989 LPRINT"   CUANDO EL AVANCE DE TIEMPO EN MINUTOS ES DE" ;AQ/60
990 LPRINT"   SIENDO LAS PROPIEDADES DEL MATERIAL"
991 LPRINT" "
992 LPRINT"   CONDUCTIVIDAD DEL LADRILLO EN W/M K=" ;K
993 LPRINT"   DENSIDAD DEL LADRILLO EN KG/M3 =" ;PR
994 LPRINT"   CALOR ESPECIFICO EN KJ/KG K =" ;CP
995 LPRINT"   ABSORTIVIDAD DEL LADRILLO =" ;O
996 LPRINT"   PROPIEDADES DEL COMBUSTIBLE"
997 LPRINT"   PODER CALORIFICO INFERIOR =" ;PCI
998 LPRINT"   EMISIVIDAD DEL GAS =" ;E
999 LPRINT"   RELACION AIRE COMBUSTIBLE =" ; MAC;
1000 LPRINT"-";1
1001 LPRINT" "
1002 LPRINT"   CUANDO EXISTE UN PORCENTAJE DE PERDIDAS DE=" ;PT*100

```

```

1003 LPRINT" "
1004 LPRINT"TEMPERATURA DEL GAS SIN EFECTO DEL HORNO=";300+PCI*.7/(20*CPG)
1005 LPRINT" "
1006     FOR I=0 TO 9
1007         IF I>0 THEN GOTO 1010
1008         LPRINT" NODO";I;
1009         GOTO 1011
1010         LPRINT" NODO";I;
1011     NEXT I:LPRINT
1035 REM *****
1040 REM *           A TIEMPO IGUAL A CERO SE CONSIDERA QUE LA           *
1045 REM *           TEMPERATURA DE LA SUPERFICIE INTERIOR           *
1050 REM *           ES UNIFORME Y VIENE DADA POR LA SIGUIENTE EXPRESION: *
1060 REM *****
1070     TINIC=T0+(100*ZA-T0)*(HR+HC)*AQ/(PR*CP*AX*5)
1080 REM *****
1090 REM *           SE PROCEDE A DAR LOS VALORES INICIALES           *
1100 REM *           A LOS NODOS EXPUESTOS A LA LLAMA .           *
1110 REM *****
1130         FOR I=0 TO S
1140             T(I,R,J)=TINIC
1145             SUM=SUM+T(I,R,J)
1148             W=W+1
1150         NEXT I
1180     FOR L=0 TO R-1
1190         T(S,L,J)=TINIC
1195         SUM=SUM+T(S,L,J)
1198         W=W+1
1200     NEXT L
1214     X=SUM/(100*W)
1218     TW=X
1219     FOR L=0 TO 7
1220         FOR I=0 TO 9
1221             LPRINT USING"#####.##";T(I,L,J);
1222         NEXT I:LPRINT
1223     NEXT L
1229     IF J=0 THEN GOTO 470
1230     TG=ZA*100
1240     BA=(HR+HC)*AX/K
1250 REM *****
1320 REM *           GRAFICA DE LA UBICACION NODAL           *
1325 REM *           PARA EFECTO DE COMPROBAR LAS           *
1330 REM *           ECUACIONES UTILIZADAS PARA SU RESOLUCION. *
1340 REM *****
1350 REM     NODO 11           NODO 10           NODO 9
1360 REM
1370 REM     NODO 12           NODO 13
1375 REM
1380 REM     NODO 1  NODO 2  NODO 3           NODO 8
1385 REM
1390 REM           NODO 4
1395 REM
1400 REM           NODO 5  NODO 6  NODO 7

```

```

5280 REM *****
5290 REM *          CALCULO DE LOS NODOS UBICADOS          *
5295 REM *          EN LA SUPERFICIE INTERIOR DEL HORNO    *
5300 REM *          QUE CORRESPONDEN A LOS VISTOS POR LA LLAMA *
5310 REM *****
5420 L=R
5430 Q=0
5440 I=0
5445 REM          *****
5450 REM          *  NODO 1  *
5455 REM          *****
5461 QR=5.67*F*(E*(T(0,0,J-1)/100)^4-O*(T(I,L,J-1)/100)^4)
5462 HR=QR/(T(0,0,J-1)-T(I,L,J-1))
5463 BA=(HR+HC)*AX/K
5464 AR=AX/2
5465 QT(Q)=(HR+HC)*AR*(T(0,0,J-1)-T(I,L,J-1))
5470 TT=T(I+1,L,J-1)+T(I,L+1,J-1)
5480 T(I,L,J)=TT*2*F0+2*BA*F0*TG+T(I,L,J-1)*(1-2*BA*F0-4*F0)
5500 SUM=T(I,L,J)+SUM
5520 W=W+1
5530 REM          *****
5540 REM          *  NODOS 2  *
5550 REM          *****
5551 Q=Q+1
5560 FOR I=1 TO S-1
5561 QR=5.67*F*(E*(T(0,0,J-1)/100)^4-O*(T(I,L,J-1)/100)^4)
5562 HR=QR/(T(0,0,J-1)-T(I,L,J-1))
5563 BA=(HR+HC)*AX/K
5564 AR=AX
5565 QT(Q)=(HR+HC)*AR*(T(0,0,J-1)-T(I,L,J-1))
5600 TT=T(I-1,L,J-1)+2*T(I,L+1,J-1)+T(I+1,L,J-1)
5620 T(I,L,J)=2*F0*BA*TG+T(I,L,J-1)*(1-2*F0*BA-4*F0)+TT*F0
5640 SUM=SUM+T(I,L,J)
5660 W=W+1
5661 Q=Q+1
5680 NEXT I
5700 I=S
5710 REM          *****
5720 REM          *  NODO 3  *
5730 REM          *****
5731 QR=5.67*F*(E*(T(0,0,J-1)/100)^4-O*(T(I,L,J-1)/100)^4)
5732 HR=QR/(T(0,0,J-1)-T(I,L,J-1))
5733 BA=(HR+HC)*AX/K
5734 AR=AX
5735 QT(Q)=(HR+HC)*AR*(T(0,0,J-1)-T(I,L,J-1))
5740 TT=2*T(I-1,L,J-1)+2*T(I,L-1,J-1)+4*T(I+1,L,J-1)
5750 TT=TT+4*T(I,L+1,J-1)
5760 T(I,L,J)=4*BA*F0*TG/3+T(I,L,J-1)*(1-4*BA*F0/3-4*F0)+F0*TT/3
5770 SUM=SUM+T(I,L,J)
5780 W=W+1
5790 REM          *****
5800 REM          *  NODOS 4  *
5820 REM          *****

```

```

5821 Q=Q+1
5840 FOR L=1 TO R-1
5841     QR=5.67*F*(E*(T(0,0,J-1)/100)^4-0*(T(I,L,J-1)/100)^4)
5842     HR=QR/(T(0,0,J-1)-T(I,L,J-1))
5843     BA=(HR+HC)*AX/K
5844     AR=AX
5845     QT(Q)=(HR+HC)*AR*(T(0,0,J-1)-T(I,L,J-1))
5860     TT=T(I,L+1,J-1)+T(I,L-1,J-1)+2*T(I+1,L,J-1)
5880     T(I,L,J)=2*F0*BA*TG+F0*TT+T(I,L,J-1)*(1-2*F0*BA-4*F0)
5890     SUM=SUM+T(I,L,J)
5895     Q=Q+1
5900     W=W+1
5905 NEXT L
5907 REM *****
5910 REM *     NODO 5     *
5915 REM *****
5925 L=0
5926     QR=5.67*F*(E*(T(0,0,J-1)/100)^4-0*(T(I,L,J-1)/100)^4)
5927     HR=QR/(T(0,0,J-1)-T(I,L,J-1))
5928     BA=(HR+HC)*AX/K
5929     AR=AX/2
5930     QT(Q)=(HR+HC)*AR*(T(0,0,J-1)-T(I,L,J-1))
5931     TT=T(I+1,L,J-1)+T(I,L+1,J-1)
5940     T(I,L,J)=2*F0*TT+2*F0*BA*TG+T(I,L,J-1)*(1-2*BA*F0-4*F0)
5960     SUM=SUM+T(I,L,J)
5980     W=W+1
6050 TW=SUM/(100*W)
6150 X=TW
6250 REM *****
6260 REM * CALCULO DE LA TEMPERATURA DE LOS NODOS PARA EL PLANO Y=0 *
6270 REM * CORRESPONDIENTES A LA SUPERFICIE DEL SUELO DEL HORNO QUE *
6280 REM *     QUE SE LA CONSIDERA PERFECTAMENTE AISLADA.     *
6290 REM *****
6291 REM
6292 REM *****
6295 REM *     NODO 6     *
6299 REM *     *
6300 L=0
7050     FOR I=S+1 TO N-1
7065         TT=T(I-1,L,J-1)+T(I+1,L,J-1)+2*T(I,L+1,J-1)
7090         T(I,L,J)=F0*TT+T(I,L,J-1)*(1-4*F0)
7100     NEXT I
7150 I=N
7180 REM *****
7200 REM * CALCULO DE LA TEMP. EL NODO UBICADO EN LA SUPERFICIE *
7250 REM * EXTERIOR DEL HORNO EN EL PLANO Y=0 CORRESP.AL SUELO *
7300 REM *****
7320 REM
7330 REM *****
7350 REM *     NODO 7     *
7380 REM *****
7400 TT=T(I-1,L,J-1)+T(I,L+1,J-1)
7450 T(I,L,J)=2*F0*TT+T(I,L,J-1)*(1-4*F0-2*B*F0)+2*F0*B*TO

```

```

7549 REM *****
7550 REM * CALCULO DE LA TEMP. DE LOS NODOS PARA EL PLANO X=X *
7560 REM * PARA LA UBICACION I=N EN LA SUPERFICIE EXTERIOR. *
7570 REM *****
7579 REM *****
7580 REM * NODOS 8 *
7590 REM *****
7600 FOR L=1 TO M-1
7650     TT=T(I,L-1,J-1)+T(I,L+1,J-1)+2*T(I-1,L,J-1)
7660     T(I,L,J)=2*F0*B*T0+F0*TT+T(I,L,J-1)*(1-2*F0*B-4*F0)
7675 NEXT L
7700 REM *****
7750 REM * NODO 9 *
7775 REM *****
7800 L=M
7825     TT=T(I,L-1,J-1)+T(I-1,L,J-1)
7850     T(I,L,J)=2*F0*TT+T(I,L,J-1)*(1-4*F0-4*F0*B)+4*F0*B*T0
7875 REM *****
7900 REM * CALCULO DE LA TEMP. DE LOS NODOS PARA LA SUPERFICIE *
7950 REM * SUPERIOR DEL HORNO EN EL PLANO Y=Y. UBICADOS EN L=M *
7959 REM *****
7960 REM *****
7965 REM * NODOS 10 *
7975 REM *****
8000     FOR I=1 TO N-1
8050         TT=T(I-1,L,J-1)+T(I+1,L,J-1)+2*T(I,L-1,J-1)
8100         T(I,L,J)=F0*TT+T(I,L,J-1)*(1-4*F0-2*F0*B)+2*F0*B*T0
8150     NEXT I
8160 REM *****
8170 REM *     CALCULO DE LA TEMPERATURA DE LOS NODOS     *
8180 REM * CUANDO X=0 PARA UNA UBICACION I=0 .VARIANDO L *
8185 REM *****
8190 REM *****
8195 REM * NODO 11 *
8196 REM *****
8197 I=0
8199 L=M
8200     TT=T(I,L-1,J-1)+T(I+1,L,J-1)
8225     T(I,L,J)=2*F0*TT+T(I,L,J-1)*(1-4*F0-2*F0*B)+2*F0*B*T0
8300 L=M
8320 REM *****
8325 REM * NODOS 12 *
8350 REM *****
8375 I=0
8380     FOR L=R+1 TO M-1
8390         TT=T(I,L-1,J-1)+T(I,L+1,J-1)+2*T(I+1,L,J-1)
8392         T(I,L,J)=TT*F0+T(I,L,J-1)*(1-4*F0)
8394     NEXT L
8399 REM *****
8400 REM * TEMPERATURA PARA LOS NODOS INTERIRES EN LA SIMETRIA *
8425 REM * CUANDO LAS UBICACIONES I Y L SON DIFERENTES DE CERO *
8440 REM *****
8441 REM

```

```

8450 REM *****
8475 REM * NODOS 13 *
8490 REM *****
8500 FOR I=1 TO N-1
8510 FOR L=R+1 TO M-1
8525 TT=T(I,L-1,J-1)+T(I-1,L,J-1)+T(I+1,L,J-1)+T(I,L+1,J-1)
8550 T(I,L,J)=F0*TT+T(I,L,J-1)*(1-4*F0)
8575 NEXT L
8590 NEXT I
8600 FOR I=S+1 TO N-1
8625 FOR L=1 TO R
8650 TT=T(I,L-1,J-1)+T(I-1,L,J-1)+T(I+1,L,J-1)+T(I,L+1,J-1)
8675 T(I,L,J)=F0*TT+T(I,L,J-1)*(1-4*F0)
8680 NEXT L
8690 NEXT I
8755 FOR L=0 TO M
8760 FOR I=0 TO N
8765 T(I,L,0)=T(I,L,J)
8770 NEXT I
8775 NEXT L
8780 J=0
8800 XX=XX+1
8850 JX=JX+1
8900 IF XX<7 THEN GOTO 15000
8950 XX=0
9000 LPRINT" "
9050 FOR I=0 TO 9
9100 IF I>0 THEN GOTO 9250
9150 LPRINT" NODO";I;
9200 GOTO 9300
9250 LPRINT" NODO";I;
9300 NEXT I:LPRINT
9350 LPRINT" "
14050 REM LOS RESULTADOS OBTENIDOS SON:
14775 FOR L=0 TO 7
14800 FOR I=0 TO 9
14825 LPRINT USING"#####.#";T(I,L,J);
14850 NEXT I:LPRINT
14875 NEXT L
14950 LPRINT" "
14951 FOR I=0 TO S+R
14952 LPRINT USING"#####.#";QT(I);
14953 NEXT I:LPRINT
14955 LPRINT" "
14975 LPRINT" EL TIEMPO CORRIDO EN MINUTOS ES:";AQ*JX/60
14999 LPRINT" "
15000 IF T(N-2,R,J)<900 THEN GOTO 470
15050 END

```

5.3 TRATAMIENTO TRIDIMENSIONAL

CONDUCTIVIDAD CONSTANTE.

PROGRAMA "QQQ" ALGORITMO

Este programa calcula la distribución de temperatura en un horno ladrillero, en el que tienen lugar los procesos de transferencia de calor en estado transiente. Se realiza el programa considerando la geometría tridimensional mostrada en la figura III.4 con una distribución nodal igual a la del programa QQ para cada plano de Z.

1.- Se ingresan todas las propiedades y valores necesarios para el cálculo.

2.- Se dimensionan las matrices a utilizar. En este caso se tiene:

$T(N,M,P,1)$, Matriz para guardar los valores de temperatura para cada nodo en las diferentes posiciones X,Y,Z en el tiempo actual y anterior.

$QT(S+R,P)$, Matriz que almacena el calor que ingresa a cada nodo expuesto a la llama en cualquier posición en el plano X-Y , para cada avance en Z.

$M(500)$, Almacena el valor de tanteo en el cálculo de la temperatura del gas.

TW(P) y X(P), Vectores que Almacenan el valor medio de la temperatura en la pared expuesta en el plano X-Y para cada posición Z.

3.- Se Inicializan los vectores X(P) Y TW(P).

4.- Se dan los valores iniciales de temperatura para el horno a tiempo cero (-).

5.- Se realiza el cálculo de la difusividad térmica, Biot para el exterior, Fournier y el factor de forma.

6.- Se calcula la temperatura del gas de la forma descrita en el programa Q para una posición específica en Z. La variación de la temperatura del gas se la obtiene de la consideración que este pierde a su paso un calor que es entregado a la superficie que a quedado atrás en su camino.

7.- Se calcula la temperatura de los nodos expuestos. A tiempo cero se considera que es uniforme para el plano X-Y. Con la temperatura del gas para cada posición Z se obtiene la temperatura de estos nodos.

8.- Para los avances de tiempo, se calcula la temperatura del gas según lo descrito anteriormente y la de los nodos con la ecuación característica de acuerdo a su posición en X,Y,Z.

9.- se continua el cálculo hasta que se cumpla la condición deseada.

CODIFICACION

```

10 REM *****
11 REM *** ***
12 REM *** PROGRAMA QQQ ***
13 REM *** ***
14 REM *****
20 REM *****
40 REM * ESTE PROGRAMA CALCULA LA DISTRIBUCION DE TEMP. EN UN HORNO *
50 REM * LADRILLERO EN EL QUE TIENEN LUGAR LOS PROCESOS DE *
60 REM * TRANSFERENCIA DE CALOR EN ESTADO TRANSIENTE. SE CONSIDERA *
70 REM * LA VARIACION DE LA TEMPERATURA DEL GAS Y *
75 REM * SE DESARROLLA EL PROGRAMA EN TRES DIMENSIONES *
76 REM *****
80 J=0
90 INPUT"INGRESE LOS VALORES DE X,Y,Z,AX";X,Y,Z,AX
110 INPUT"INGRESE LOS VALORES DE X1,Y1";X1,Y1
120 INPUT"INGRESE PROPIEDADES DEL COMB.CPI,CPG,E,MC";CPI,CPG,E,MC
125 INPUT"INGRESE PROPIEDADES DEL LADR. PR,CP,K,O";PR,CP,K,O
126 INPUT"INGRESE ESP. DE TIEMPO Y TEMP. AMB.";AQ,TO
195 XJ=-1
200 HC=10
220 MAC=19
230 PT=.3
240 H=5
270 N=X/AX
280 M=Y/AX
290 P=Z/AX
295 P1=.3/AX
298 P2=1+P1
300 S=X1/AX
310 R=Y1/AX
320 AA=AX*(X1+Y1)
330 DIM T(N,M,P,1)
335 DIM QT(S+R,P)
340 DIM M(500)
342 DIM TW(P)
345 DIM X(P)
346 FOR I=0 TO P
347 TW(I)=T0/100
348 X(I)=TW(I)
349 NEXT I
350 FOR Q=0 TO P
360 FOR L=0 TO M
370 FOR I=0 TO N
380 T(I,L,Q,J)=T0
390 NEXT I
400 NEXT L
410 NEXT Q
420 AL=K/(PR*CP)
430 B=H*AX/K
440 F0=AL*AQ/AX^2
445 F=.03*3.1416/(X1+Y1)

```

```

460 J=-1
461 REM
465 REM *****
470 REM *                EMPIEZA LA ITERACION                *
480 REM *                SE INICIA EL AVANCE DESDE UN TIEMPO IGUAL A CERO                *
490 REM *                EN EL QUE EL HORNO SE ENCUENTRA A LA TEMP. AMBIENTE                *
500 REM *                HASTA QUE SE CUMPLA AL CONDICION DESEADA                *
510 REM *****
600 Q=0
605 X=X(Q)
610 J=J+1
612 A=(X1+Y1)*.3
620 V=PCI*(1-PT)*MC+TO*CPG*MC*(1+MAC)+5.67*A*F*(TW(Q)^4)*D+HC*A*100*TW(Q)
630 L=0
640 C=1
650 SUM=0
660 W=0
668 REM *****
670 REM * LOS VALORES DE LA TEMPERATURA DEL GAS SE OBTIENE *
680 REM *                MEDIANTE METODO ITERATIVO                *
687 REM *****
689 REM                *****
690 REM                * EMPIEZA EL TANTEO *
699 REM                *****
700 L=L+1
710 X=X+C
720                U=5.67*F*A*E*X^4+100*(CPG*(MAC+1)*MC+A*HC)*X
730                M(L)=ABS(V-U)
740                IF (V-U)>0 THEN GOTO 690
750                ZA=(M(L-1)*X+M(L)*(X-C))/(M(L-1)+M(L))
760                YA=5.67*A*F*E*ZA^4+100*(CPG*(MAC+1)*MC+A*HC)*ZA
850                IF ABS(YA-V)<10 THEN GOTO 910
860                X=X-C
870                C=C/10
880                X=X-C
890                L=0
900                IF L=0 THEN GOTO 690
930                HR=5.67*F*(E*ZA^4-0*TW(Q)^4)/(100*(ZA-TW(Q)))
940                PRINT"EL VALOR DE HR ES:";HR
945                FOR Q=0 TO P1
950                    FOR I=0 TO S-1
960                        FOR L=0 TO R-1
980                            T(I,L,Q,J)=ZA*100
1000                        NEXT L
1010                    NEXT I
1015                NEXT Q
1020                IF J>0 THEN GOTO 1217
1030 REM *****
1040 REM *                A TIEMPO IGUAL A CERO SE CONSIDERA QUE LA                *
1045 REM *                TEMPERATURA DE LA SUPERFICIE INTERIOR ES                *
1050 REM *                UNIFORME Y VIENE DADA POR LA SIGUIENTE EXPRESION:                *
1055 REM *****
1060 REM

```

```

1070 TINIC=TO+AQ*(100*ZA-T0)*(HR+HC)/(PR*CP*AX*5)
1120 FOR Q=0 TO P1
1130 FOR I=0 TO S
1140 T(I,R,Q,J)=TINIC
1150 NEXT I
1160 NEXT Q
1170 FOR Q=0 TO P1
1180 FOR L=0 TO R-1
1190 T(S,L,Q,J)=TINIC
1200 NEXT L
1210 NEXT Q
1211 FOR I=0 TO P1
1212 X(I)=TINIC/100
1213 TW(I)=X(I)
1214 NEXT I
1217 FOR Q=P2 TO P
1218 A=A+AA
1219 V=PCI*(1-PT)*MC+T0*CPG*MC*(1+MAC)+5.67*A*F*(TW(Q)^4)*0+HC*A*100*TW(Q)
1220 L=0
1221 C=1
1222 X=X(Q)
1223 SUM=0
1224 W=0
1227 TANTEO
1228 L=L+1
1229 X=X+C
1230 U=5.67*F*A*E*X^4+100*(CPG*(MAC+1)*MC+A*HC)*X
1231 M(L)=ABS(V-U)
1234 IF (V-U)>0 THEN GOTO 1227
1235 ZA=(M(L-1)*X+M(L)*(X-C))/(M(L-1)+M(L))
1236 YA=5.67*A*F*E*ZA^4+100*(CPG*(MAC+1)*MC+A*HC)*ZA
1237 IF ABS(YA-V)<10 THEN GOTO 1243
1238 X=X-C
1239 C=C/10
1240 X=X-C
1241 L=0
1242 IF L=0 THEN GOTO 1227
1243 REM *** TEMPERATURA DEL GAS ***
1244 REM
1245 HR=5.67*F*(E*ZA^4-0*TW(Q)^4)/(100*(ZA-TW(Q)))
1247 FOR I=0 TO S-1
1248 FOR L=0 TO R-1
1249 T(I,L,Q,J)=ZA*100
1250 NEXT L
1251 NEXT I
1252 IF J>0 THEN GOTO 1275
1253 REM
1254 TINIC=TO+AQ*(100*ZA-T0)*(HR+HC)/(PR*CP*AX*5)
1255 REM
1257 FOR I=0 TO S
1258 T(I,R,Q,J)=TINIC
1259 SUM=SUM+T(I,R,Q,J)
1260 W=W+1

```

```

1261         NEXT I
1262 XJ=-1
1264         FOR L=0 TO R-1
1265             T(S,L,Q,J)=TINIC
1268         NEXT L
1270             X(Q)=TINIC/100
1271             TW(Q)=X(Q)
1275 NEXT Q
1280         IF J=0 THEN GOTO 13000
1285 REM *****
1290 REM *   TEMP. PARA NODOS UBICADOS EN LA SUPERFICIE INTERIOR *
1300 REM *           DEL HORNO QUE CORRESPONDEN A LOS           *
1301 REM *           VISTOS POR LA LLAMA PARA UBICACION I=S,L=R *
1302 REM *****
1305 REM
1310 REM *****
1320 REM *           GRAFICA DE LA UBICACION NODAL PARA           *
1325 REM *           EFECTO DE COMPROBACION DE LAS             *
1330 REM *           ECUACIONES UTILIZADAS PARA SU RESOLUCION. *
1340 REM *****
1345 REM
1350 REM             NODO 11             NODO 10             NODO 9
1360 REM
1370 REM             NODO 12             NODO 13
1375 REM
1380 REM             NODO 1  NODO 2  NODO 3             NODO 8
1385 REM
1390 REM             NODO 4
1395 REM
1400 REM             NODO 5  NODO 6  NODO 7
1410 REM
1420 L=R
1430 Q=0
1435 D=0
1440 I=0
1445 REM             *****
1450 REM             *   NODO 1   *
1460 REM             *****
1461 QR=5.67*F*(E*(T(0,0,Q,J-1)/100)^4-0*(T(I,L,Q,J-1)/100)^4)
1462 HR=QR/(T(0,0,Q,J-1)-T(I,L,Q,J-1))
1463 BA=(HR+HC)*AX/K
1464 AR=AX^2/4
1465 QT(D,Q)=(HR+HC)*AR*(T(0,0,Q,J-1)-T(I,L,Q,J-1))
1470 TT=T(I+1,L,Q,J-1)+T(I,L+1,Q,J-1)+T(I,L,Q+1,J-1)
1480 T(I,L,Q,J)=TT*2*F0+2*BA*F0*T(0,0,Q,J-1)+T(I,L,Q,J-1)*(1-2*BA*F0-6*F0)
1500 SUM=T(I,L,Q,J)
1520 W=1
1530 REM             *****
1540 REM             *   NODOS 2   *
1560 REM             *****
1561 D=D+1
1580 FOR I=1 TO S-1
1581 QR=5.67*F*(E*(T(0,0,Q,J-1)/100)^4-0*(T(I,L,Q,J-1)/100)^4)

```

```

1582 HR=QR/(T(0,0,Q,J-1)-T(I,L,Q,J-1))
1583 BA=(HR+HC)*AX/K
1584 AR=AX^2/2
1585 QT(D,Q)=(HR+HC)*AR*(T(0,0,Q,J-1)-T(I,L,Q,J-1))
1600 TT=T(I-1,L,Q,J-1)+2*T(I,L+1,Q,J-1)+T(I+1,L,Q,J-1)+2*T(I,L,Q+1,J-1)
1610 D=D+1
1620 T(I,L,Q,J)=2*F0*BA*T(0,0,Q,J-1)+T(I,L,Q,J-1)*(1-2*F0*BA-6*F0)+TT*F0
1640 SUM=SUM+T(I,L,Q,J)
1660 W=W+1
1680 NEXT I
1700 I=S
1710 REM *****
1720 REM * NODO 3 *
1730 REM *****
1731 QR=5.67*F*(E*(T(0,0,Q,J-1)/100)^4-O*(T(I,L,Q,J-1)/100)^4)
1732 HR=QR/(T(0,0,Q,J-1)-T(I,L,Q,J-1))
1733 BA=(HR+HC)*AX/K
1734 AR=AX^2/2
1735 QT(D,Q)=(HR+HC)*AR*(T(0,0,Q,J-1)-T(I,L,Q,J-1))
1740 TT=T(I-1,L,Q,J-1)+T(I,L-1,Q,J-1)+2*T(I+1,L,Q,J-1)+3*T(I,L,Q+1,J-1)
1750 TT=(TT+2*T(I,L+1,Q,J-1))*2*F0/3
1760 T(I,L,Q,J)=4*BA*F0*T(0,0,Q,J-1)/3+T(I,L,Q,J-1)*(1-4*BA*F0/3-6*F0)+TT
1770 SUM=SUM+T(I,L,Q,J)
1780 W=W+1
1800 REM *****
1805 REM * NODOS 4 *
1808 REM *****
1810 D=D+1
1820 REM
1840 FOR L=1 TO R-1
1841 QR=5.67*F*(E*(T(0,0,Q,J-1)/100)^4-O*(T(I,L,Q,J-1)/100)^4)
1842 HR=QR/(T(0,0,Q,J-1)-T(I,L,Q,J-1))
1843 BA=(HR+HC)*AX/K
1844 AR=AX^2/2
1845 QT(D,Q)=(HR+HC)*AR*(T(0,0,Q,J-1)-T(I,L,Q,J-1))
1860 TT=T(I,L+1,Q,J-1)+T(I,L-1,Q,J-1)+2*T(I+1,L,Q,J-1)+2*T(I,L,Q+1,J-1)
1880 T(I,L,Q,J)=2*F0*BA*T(0,0,Q,J-1)+F0*TT+T(I,L,Q,J-1)*(1-2*F0*BA-6*F0)
1890 SUM=SUM+T(I,L,Q,J)
1895 D=D+1
1900 W=W+1
1905 NEXT L
1908 REM *****
1910 REM * NODO 5 *
1915 REM *****
1920 L=0
1921 QR=5.67*F*(E*(T(0,0,Q,J-1)/100)^4-O*(T(I,L,Q,J-1)/100)^4)
1922 HR=QR/(T(0,0,Q,J-1)-T(I,L,Q,J-1))
1923 BA=(HR+HC)*AX/K
1924 AR=AX^2/4
1925 QT(D,Q)=(HR+HC)*AR*(T(0,0,Q,J-1)-T(I,L,Q,J-1))
1930 TT=T(I+1,L,Q,J-1)+T(I,L+1,Q,J-1)+T(I,L,Q+1,J-1)
1940 T(I,L,Q,J)=2*F0*TT+2*F0*BA*T(0,0,Q,J-1)+T(I,L,Q,J-1)*(1-2*BA*F0-6*F0)
1960 SUM=SUM+T(I,L,Q,J)

```

```

1980 W=W+1
2000 TW(Q)=SUM/(100*W)
2100 X(Q)=TW(Q)
2250 REM *****
2260 REM * CALCULO DE LA TEMPERATURA DE LOS NODOS PARA EL PLANO Y=0 *
2270 REM * CORRESPONDIENTES A LA SUPERFICIE DEL SUELO DEL HORNO QUE*
2280 REM * QUE SE LA CONSIDERA PERFECTAMENTE AISLADA. *
2290 REM *****
2291 REM
2292 REM *****
2295 REM * NODO 6 *
2299 REM *****
2300 L=0
3050 FOR I=S+1 TO N-1
3075 TT=T(I-1,L,Q,J-1)+T(I+1,L,Q,J-1)+2*T(I,L+1,Q,J-1)+2*T(I,L,Q+1,J-1)
3090 T(I,L,Q,J)=F0*TT+T(I,L,Q,J-1)*(1-6*F0)
3100 NEXT I
3150 I=N
3180 REM *****
3200 REM * CALCULO DE LA TEMPERATURA DEL NODO UBICADO EN LA *
3250 REM * SUPERFICIE EXTERIOR DEL HORNO EN EL PLANO Y=0 *
3300 REM * CORRESPONDIENTE AL SUELO *
3310 REM *****
3312 REM
3330 REM *****
3350 REM * NODO 7 *
3380 REM *****
3400 TT=T(I-1,L,Q,J-1)+T(I,L+1,Q,J-1)+T(I,L,Q+1,J-1)
3450 T(I,L,Q,J)=2*F0*TT+T(I,L,Q,J-1)*(1-6*F0-2*B*F0)+2*F0*B*T0
3500 REM *****
3550 REM * CALCULO DE LA TEMP. DE LOS NODOS PARA EL PLANO X=X *
3560 REM * PARA LA UBICACION I=N EN LA SUPERFICIE EXTERIOR. *
3570 REM *****
3577 REM *****
3580 REM * NODOS 8 *
3590 REM *****
3595 REM
3600 FOR L=1 TO M-1
3650 TT=T(I,L-1,Q,J-1)+T(I,L+1,Q,J-1)+2*T(I-1,L,Q,J-1)+2*T(I,L,Q+1,J-1)
3660 T(I,L,Q,J)=2*F0*B*T0+F0*TT+T(I,L,Q,J-1)*(1-2*F0*B-6*F0)
3675 NEXT L
3700 REM
3730 REM *****
3750 REM * NODO 9 *
3775 REM *****
3790 REM
3800 L=M
3825 TT=T(I,L-1,Q,J-1)+T(I-1,L,Q,J-1)+T(I,L,Q+1,J-1)
3850 T(I,L,Q,J)=2*F0*TT+T(I,L,Q,J-1)*(1-6*F0-4*F0*B)+4*F0*B*T0
3875 REM *****
3900 REM * CALCULO DE LA TEMPERATURA DE LOS NODOS PARA LA *
3950 REM * SUPERFICIE SUPERIOR DEL HORNO EN EL PLANO Y=Y. *
3960 REM * PARA LA UBICACION L=M *

```

```

3961 REM *****
3962 REM
3963 REM *****
3965 REM * NODOS 10 *
3975 REM *****
4000 FOR I=1 TO N-1
4050 TT=T(I-1,L,Q,J-1)+T(I+1,L,Q,J-1)+2*T(I,L-1,Q,J-1)+2*T(I,L,Q+1,J-1)
4100 T(I,L,Q,J)=F0*TT+T(I,L,Q,J-1)*(1-6*F0-2*F0*B)+2*F0*B*T0
4150 NEXT I
4160 REM
4165 REM *****
4170 REM * TEMPERATURA DE LOS NODOS EN EL PLANO DE SIMETRIA *
4180 REM * CUANDO Z=0 Y X=0. UBICACION I=0 Y Q=0.VARIANDO L. *
4185 REM *****
4193 REM *****
4195 REM * NODO 11 *
4196 REM *****
4197 I=0
4199 L=M
4200 TT=T(I,L-1,Q,J-1)+T(I,L,Q+1,J-1)+T(I+1,L,Q,J-1)
4225 T(I,L,Q,J)=2*F0*TT+T(I,L,Q,J-1)*(1-6*F0-2*F0*B)+2*F0*B*T0
4300 L=M
4320 REM *****
4325 REM * NODOS 12 *
4350 REM *****
4375 I=0
4380 FOR L=R+1 TO M-1
4390 TT=T(I,L-1,Q,J-1)+T(I,L+1,Q,J-1)+2*T(I,L,Q+1,J-1)+2*T(I+1,L,Q,J-1)
4392 T(I,L,Q,J)=TT*F0+T(I,L,Q,J-1)*(1-6*F0)
4394 NEXT L
4399 REM *****
4400 REM * TEMPERATURA PARA LOS NODOS INTERIRES EN AL SIMETRIA *
4425 REM * PARA UBICACIONES I Y L SON DIFERENTES DE CERO *
4430 REM *****
4460 REM *****
4475 REM * NODOS 13 *
4490 REM *****
4500 FOR I=1 TO N-1
4510 FOR L=R+1 TO M-1
4525 TT=T(I,L-1,Q,J-1)+T(I-1,L,Q,J-1)+T(I+1,L,Q,J-1)+T(I,L+1,Q,J-1)
4540 TT=TT+T(I,L,Q+1,J-1)*2
4550 T(I,L,Q,J)=F0*TT+T(I,L,Q,J-1)*(1-6*F0)
4575 NEXT L
4590 NEXT I
4600 FOR I=S+1 TO N-1
4625 FOR L=1 TO R
4650 TT=T(I,L-1,Q,J-1)+T(I-1,L,Q,J-1)+T(I+1,L,Q,J-1)+T(I,L+1,Q,J-1)
4660 TT=TT+T(I,L,Q+1,J-1)*2
4675 T(I,L,Q,J)=F0*TT+T(I,L,Q,J-1)*(1-6*F0)
4680 NEXT L
4690 NEXT I
5200 REM *****
5260 REM * SE PROCEDE A CALCULAR LA TEMP.DE LOS NODOS INTERIORES *

```

```

5270 REM *          UBICADOS EN Z VARIANDO DESDE Q=1 HASTA Q=P-1      *
5271 REM *****
5275 FOR Q=1 TO P-1
5280 REM
5290 REM CALCULO DE LOS NODOS UBICADOS EN AL SUPERFICIE INTERIOR DEL HORNO
5300 REM QUE CORRESPONDEN A LOS VISTOS POR LA LLAMA PARA UBICACION I=S,L=R
5310 REM
5420 L=R
5435 D=0
5440 I=0
5445 REM          *****
5450 REM          *      NODO 1      *
5460 REM          *****
5461 QR=5.67*F*(E*(T(0,0,Q,J-1)/100)^4-O*(T(I,L,Q,J-1)/100)^4)
5462 HR=QR/(T(0,0,Q,J-1)-T(I,L,Q,J-1))
5463 BA=(HR+HC)*AX/K
5464 AR=AX^2/2
5465 QT(D,Q)=(HR+HC)*AR*(T(0,0,Q,J-1)-T(I,L,Q,J-1))
5470 TT=2*T(I+1,L,Q,J-1)+2*T(I,L+1,Q,J-1)+T(I,L,Q+1,J-1)+T(I,L,Q-1,J-1)
5480 T(I,L,Q,J)=TT*F0+2*BA*F0*T(0,0,Q,J-1)+T(I,L,Q,J-1)*(1-2*BA*F0-6*F0)
5500 SUM=T(I,L,Q,J)
5520 W=1
5530 REM          *****
5540 REM          *      NODOS 2      *
5560 REM          *****
5561 D=D+1
5580 FOR I=1 TO S-1
5581 QR=5.67*F*(E*(T(0,0,Q,J-1)/100)^4-O*(T(I,L,Q,J-1)/100)^4)
5582 HR=QR/(T(0,0,Q,J-1)-T(I,L,Q,J-1))
5583 BA=(HR+HC)*AX/K
5584 AR=AX^2
5585 QT(D,Q)=(HR+HC)*AR*(T(0,0,Q,J-1)-T(I,L,Q,J-1))
5600 TT=T(I-1,L,Q,J-1)+2*T(I,L+1,Q,J-1)+T(I+1,L,Q,J-1)+T(I,L,Q+1,J-1)
5610 TT=TT+T(I,L,Q-1,J-1)
5620 T(I,L,Q,J)=2*F0*BA*T(0,0,Q,J-1)+T(I,L,Q,J-1)*(1-2*F0*BA-6*F0)+TT*F0
5625 D=D+1
5640 SUM=SUM+T(I,L,Q,J)
5660 W=W+1
5680 NEXT I
5700 I=S
5710 REM          *****
5720 REM          *      NODO 3      *
5730 REM          *****
5731 QR=5.67*F*(E*(T(0,0,Q,J-1)/100)^4-O*(T(I,L,Q,J-1)/100)^4)
5732 HR=QR/(T(0,0,Q,J-1)-T(I,L,Q,J-1))
5733 BA=(HR+HC)*AX/K
5734 AR=AX^2
5735 QT(D,Q)=(HR+HC)*AR*(T(0,0,Q,J-1)-T(I,L,Q,J-1))
5740 TT=2*T(I-1,L,Q,J-1)+2*T(I,L-1,Q,J-1)+4*T(I+1,L,Q,J-1)
5750 TT=(TT+4*T(I,L+1,Q,J-1)+3*T(I,L,Q-1,J-1)+3*T(I,L,Q+1,J-1))*F0/3
5760 T(I,L,Q,J)=4*BA*F0*T(0,0,Q,J-1)/3+T(I,L,Q,J-1)*(1-4*BA*F0/3-6*F0)+TT
5770 SUM=SUM+T(I,L,Q,J)
5780 W=W+1

```

```

5800 REM *****
5805 REM * NODOS 4 *
5808 REM *****
5810 D=D+1
5840 FOR L=1 TO R-1
5841 QR=5.67*F*(E*(T(0,0,Q,J-1)/100)^4-0*(T(I,L,Q,J-1)/100)^4)
5842 HR=QR/(T(0,0,Q,J-1)-T(I,L,Q,J-1))
5843 BA=(HR+HC)*AX/K
5844 AR=AX^2
5845 QT(D,Q)=(HR+HC)*AR*(T(0,0,Q,J-1)-T(I,L,Q,J-1))
5860 TT=T(I,L+1,Q,J-1)+T(I,L-1,Q,J-1)+2*T(I+1,L,Q,J-1)+T(I,L,Q+1,J-1)
5870 TT=TT+T(I,L,Q-1,J-1)
5880 T(I,L,Q,J)=2*F0*BA*T(0,0,Q,J-1)+F0*TT+T(I,L,Q,J-1)*(1-2*F0*BA-6*F0)
5890 SUM=SUM+T(I,L,Q,J)
5895 D=D+1
5900 W=W+1
5905 NEXT L
5908 REM *****
5910 REM * NODO 5 *
5915 REM *****
5920 L=0
5921 QR=5.67*F*(E*(T(0,0,Q,J-1)/100)^4-0*(T(I,L,Q,J-1)/100)^4)
5922 HR=QR/(T(0,0,Q,J-1)-T(I,L,Q,J-1))
5923 BA=(HR+HC)*AX/K
5924 AR=AX^2/2
5925 QT(D,Q)=(HR+HC)*AR*(T(0,0,Q,J-1)-T(I,L,Q,J-1))
5930 TT=2*T(I+1,L,Q,J-1)+2*T(I,L+1,Q,J-1)+T(I,L,Q+1,J-1)+T(I,L,Q-1,J-1)
5940 T(I,L,Q,J)=F0*TT+2*F0*BA*T(0,0,Q,J-1)+T(I,L,Q,J-1)*(1-2*BA*F0-6*F0)
5960 SUM=SUM+T(I,L,Q,J)
5980 W=W+1
6000 TW(Q)=SUM/(100*W)
6100 X(Q)=TW(Q)
6250 REM *****
6260 REM * CALCULO DE LA TEMPERATURA DE LOS NODOS PARA EL PLANO Y=0 *
6270 REM * CORRESPONDIENTES A LA SUPERFICIE DEL SUELO DEL HORNO QUE*
6280 REM * QUE SE LA CONSIDERA PERFECTAMENTE AISLADA. *
6290 REM *****
6292 REM *****
6295 REM * NODO 6 *
6299 REM *****
6300 L=0
7050 FOR I=S+1 TO N-1
7065 TT=T(I-1,L,Q,J-1)+T(I+1,L,Q,J-1)+2*T(I,L+1,Q,J-1)+T(I,L,Q+1,J-1)
7075 TT=TT+T(I,L,Q-1,J-1)
7090 T(I,L,Q,J)=F0*TT+T(I,L,Q,J-1)*(1-6*F0)
7100 NEXT I
7150 I=N
7161 TWI=XI
7180 REM *****
7200 REM * CALCULO DE LA TEMPERATURA DEL NODO UBICADO EN LA *
7250 REM * SUPERFICIE EXTERIOR DEL HORNO EN EL PLANO Y=0 *
7300 REM * CORRESPONDIENTE AL SUELO *
7310 REM *****

```

```

7330 REM *****
7350 REM * NODO 7 *
7380 REM *****
7400 TT=2*T(I-1,L,Q,J-1)+2*T(I,L+1,Q,J-1)+T(I,L,Q+1,J-1)+T(I,L,Q-1,J-1)
7450 T(I,L,Q,J)=F0*TT+T(I,L,Q,J-1)*(1-6*F0-2*B*F0)+2*F0*B*TO
7500 REM *****
7550 REM * CALCULO DE LA TEMP. DE LOS NODOS PARA EL PLANO X=X *
7560 REM * PARA LA UBICACION I=N EN LA SUPERFICIE EXTERIOR. *
7570 REM *****
7575 REM
7577 REM *****
7580 REM * NODOS 8 *
7590 REM *****
7595 REM
7600 FOR L=1 TO M-1
7650 TT=T(I,L-1,Q,J-1)+T(I,L+1,Q,J-1)+2*T(I-1,L,Q,J-1)+T(I,L,Q+1,J-1)
7655 TT=TT+T(I,L,Q-1,J-1)
7660 T(I,L,Q,J)=2*F0*B*TO+F0*TT+T(I,L,Q,J-1)*(1-2*F0*B-6*F0)
7675 NEXT L
7730 REM *****
7750 REM * NODO 9 *
7775 REM *****
7790 REM
7800 L=M
7825 TT=2*T(I,L-1,Q,J-1)+2*T(I-1,L,Q,J-1)+T(I,L,Q+1,J-1)+T(I,L,Q-1,J-1)
7850 T(I,L,Q,J)=F0*TT+T(I,L,Q,J-1)*(1-6*F0-4*F0*B)+4*F0*B*TO
7875 REM *****
7900 REM * CALCULO DE LA TEMPERATURA DE LOS NODOS PARA LA *
7950 REM * SUPERFICIE SUPERIOR DEL HORNO EN EL PLANO Y=Y. *
7960 REM * PARA LA UBICACION L=M *
7961 REM *****
7962 REM
7963 REM *****
7965 REM * NODOS 10 *
7975 REM *****
7980 REM
8000 FOR I=1 TO N-1
8050 TT=T(I-1,L,Q,J-1)+T(I+1,L,Q,J-1)+2*T(I,L-1,Q,J-1)+T(I,L,Q+1,J-1)
8075 TT=TT+T(I,L,Q-1,J-1)
8100 T(I,L,Q,J)=F0*TT+T(I,L,Q,J-1)*(1-6*F0-2*F0*B)+2*F0*B*TO
8150 NEXT I
8165 REM *****
8170 REM * TEMPERATURA DE LOS NODOS EN EL PLANO DE SIMETRIA *
8180 REM * CUANDO Z=0 Y X=0. UBICACION I=0 Y Q=0.VARIANDO L. *
8185 REM *****
8190 REM
8193 REM *****
8195 REM * NODO 11 *
8196 REM *****
8197 I=0
8199 L=M
8200 TT=2*T(I,L-1,Q,J-1)+T(I,L,Q+1,J-1)+2*T(I+1,L,Q,J-1)+T(I,L,Q-1,J-1)
8225 T(I,L,Q,J)=F0*TT+T(I,L,Q,J-1)*(1-6*F0-2*F0*B)+2*F0*B*TO

```

```

8250 REM
8300 L=M
8320 REM *****
8325 REM * NODOS 12 *
8350 REM *****
8375 I=0
8380 FOR L=R+1 TO M-1
8390 TT=T(I,L-1,Q,J-1)+T(I,L+1,Q,J-1)+T(I,L,Q+1,J-1)+2*T(I+1,L,Q,J-1)
8391 TT=TT+T(I,L,Q-1,J-1)
8392 T(I,L,Q,J)=TT*F0+T(I,L,Q,J-1)*(1-6*F0)
8394 NEXT L
8399 REM *****
8400 REM * TEMPERATURA PARA LOS NODOS INTERIRES EN AL SIMETRIA *
8425 REM * PARA UBICACIONES I Y L SON DIFERENTES DE CERO *
8430 REM *****
8450 REM
8460 REM *****
8475 REM * NODOS 13 *
8490 REM *****
8500 FOR I=1 TO N-1
8510 FOR L=R+1 TO M-1
8525 TT=T(I,L-1,Q,J-1)+T(I-1,L,Q,J-1)+T(I+1,L,Q,J-1)+T(I,L+1,Q,J-1)
8540 TT=TT+T(I,L,Q+1,J-1)+T(I,L,Q-1,J-1)
8550 T(I,L,Q,J)=F0*TT+T(I,L,Q,J-1)*(1-6*F0)
8575 NEXT L
8590 NEXT I
8600 FOR I=S+1 TO N-1
8625 FOR L=1 TO R
8650 TT=T(I,L-1,Q,J-1)+T(I-1,L,Q,J-1)+T(I+1,L,Q,J-1)+T(I,L+1,Q,J-1)
8660 TT=TT+T(I,L,Q+1,J-1)+T(I,L,Q-1,J-1)
8675 T(I,L,Q,J)=F0*TT+T(I,L,Q,J-1)*(1-6*F0)
8680 NEXT L
8690 NEXT I
8700 NEXT Q
9100 REM
9150 REM *****
9250 REM * SE PROCEDE AL CALCULO DE LA TEMPERATURA *
9260 REM * DE LOS NODOS EXTERIORES UBICADOS EN LA *
9270 REM * SUPERFICIE EN CONTACTO CON EL MEDIO AMBIENTE. *
9271 REM *****
9272 REM
9275 Q=P
9280 REM *****
9290 REM * CALCULO DE LOS NODOS UBICADOS EN AL SUPERFICIE INTERIOR *
9300 REM * DEL HORNO QUE CORRESPONDEN A LOS *
9305 REM * VISTOS POR LA LLAMA PARA I=S y L=R *
9308 REM *****
9420 L=R
9435 D=0
9440 I=0
9445 REM *****
9450 REM * NODO 1 *
9460 REM *****

```

```

9461 QR=5.67*F*(E*(T(0,0,Q,J-1)/100)^4-0*(T(I,L,Q,J-1)/100)^4)
9462 HR=QR/(T(0,0,Q,J-1)-T(I,L,Q,J-1))
9463 BA=(HR+HC)*AX/K
9464 AR=AX^2/4
9465 QT(D,Q)=(HR+HC)*AR*(T(0,0,Q,J-1)-T(I,L,Q,J-1))
9470 TT=T(I+1,L,Q,J-1)+T(I,L+1,Q,J-1)+T(I,L,Q-1,J-1)
9480 TT=TT*2*F0+2*BA*F0*T(0,0,Q,J-1)+T(I,L,Q,J-1)*(1-2*BA*F0-6*F0-2*F0*B)
9490 T(I,L,Q,J)=TT+2*F0*B*T0
9500 SUM=T(I,L,Q,J)
9520 W=1
9530 REM *****
9540 REM * NODOS 2 *
9560 REM *****
9561 D=D+1
9580 FOR I=1 TO S-1
9581 QR=5.67*F*(E*(T(0,0,Q,J-1)/100)^4-0*(T(I,L,Q,J-1)/100)^4)
9582 HR=QR/(T(0,0,Q,J-1)-T(I,L,Q,J-1))
9583 BA=(HR+HC)*AX/K
9584 AR=AX^2/2
9585 QT(D,Q)=(HR+HC)*AR*(T(0,0,Q,J-1)-T(I,L,Q,J-1))
9600 TT=T(I-1,L,Q,J-1)+2*T(I,L+1,Q,J-1)+T(I+1,L,Q,J-1)+2*T(I,L,Q-1,J-1)
9610 D=D+1
9620 TT=2*F0*BA*T(0,0,Q,J-1)+T(I,L,Q,J-1)*(1-2*F0*BA-6*F0-2*B*F0)+TT*F0
9630 T(I,L,Q,J)=TT+2*F0*B*T0
9640 SUM=SUM+T(I,L,Q,J)
9660 W=W+1
9680 NEXT I
9700 I=S
9710 REM *****
9720 REM * NODO 3 *
9730 REM *****
9731 QR=5.67*F*(E*(T(0,0,Q,J-1)/100)^4-0*(T(I,L,Q,J-1)/100)^4)
9732 HR=QR/(T(0,0,Q,J-1)-T(I,L,Q,J-1))
9733 BA=(HR+HC)*AX/K
9734 AR=AX^2/2
9735 QT(D,Q)=(HR+HC)*AR*(T(0,0,Q,J-1)-T(I,L,Q,J-1))
9740 TT=T(I-1,L,Q,J-1)+T(I,L-1,Q,J-1)+2*T(I+1,L,Q,J-1)+3*T(I,L,Q-1,J-1)
9750 TT=(TT+2*T(I,L+1,Q,J-1))*2*F0/3
9760 TT=4*BA*F0*T(0,0,Q,J-1)/3+T(I,L,Q,J-1)*(1-4*BA*F0/3-6*F0-2*F0*B)+TT
9765 T(I,L,Q,J)=TT+2*F0*B*T0
9770 SUM=SUM+T(I,L,Q,J)
9780 W=W+1
9800 REM *****
9805 REM * NODOS 4 *
9808 REM *****
9810 D=D+1
9820 REM
9840 FOR L=1 TO R-1
9841 QR=5.67*F*(E*(T(0,0,Q,J-1)/100)^4-0*(T(I,L,Q,J-1)/100)^4)
9842 HR=QR/(T(0,0,Q,J-1)-T(I,L,Q,J-1))
9843 BA=(HR+HC)*AX/K
9844 AR=AX^2/2
9845 QT(D,Q)=(HR+HC)*AR*(T(0,0,Q,J-1)-T(I,L,Q,J-1))

```

```

9860 TT=T(I,L+1,Q,J-1)+T(I,L-1,Q,J-1)+2*T(I+1,L,Q,J-1)+2*T(I,L,Q-1,J-1)
9880 TT=2*FO*BA*T(0,0,Q,J-1)+FO*TT+T(I,L,Q,J-1)*(1-2*FO*BA-6*FO-2*B*FO)
9885 T(I,L,Q,J)=TT+2*FO*B*T0
9890 SUM=SUM+T(I,L,Q,J)
9895 D=D+1
9900 W=W+1
9905 NEXT L
9908 REM *****
9910 REM * NODO 5 *
9915 REM *****
9920 L=0
9921 QR=5.67*F*(E*(T(0,0,Q,J-1)/100)^4-O*(T(I,L,Q,J-1)/100)^4)
9922 HR=QR/(T(0,0,Q,J-1)-T(I,L,Q,J-1))
9923 BA=(HR+HC)*AX/K
9924 AR=AX^2/4
9925 QT(D,Q)=(HR+HC)*AR*(T(0,0,Q,J-1)-T(I,L,Q,J-1))
9930 TT=T(I+1,L,Q,J-1)+T(I,L+1,Q,J-1)+T(I,L,Q-1,J-1)
9940 TT=2*FO*TT+2*FO*BA*T(0,0,Q,J-1)+T(I,L,Q,J-1)*(1-2*BA*FO-6*FO-2*FO*B)
9950 T(I,L,Q,J)=TT+2*FO*B*T0
9960 SUM=SUM+T(I,L,Q,J)
9980 W=W+1
9981 TW(Q)=SUM/(100*W)
9985 X(Q)=TW(Q)
10250 REM *****
10260 REM * CALCULO DE LA TEMPERATURA DE LOS NODOS PARA EL PLANO Y=0 *
10270 REM * CORRESPONDIENTES A LA SUPERFICIE DEL SUELO DEL HORNO QUE*
10280 REM * QUE SE LA CONSIDERA PERFECTAMENTE AISLADA. *
10290 REM *****
10291 REM
10292 REM *****
10295 REM * NODO 6 *
10299 REM *****
10300 L=0
11050 FOR I=S+1 TO N-1
11065 TT=T(I-1,L,Q,J-1)+T(I+1,L,Q,J-1)+2*T(I,L+1,Q,J-1)+2*T(I,L,Q-1,J-1)
11090 T(I,L,Q,J)=FO*TT+T(I,L,Q,J-1)*(1-6*FO-2*FO*B)+2*FO*B*T0
11100 NEXT I
11150 I=N
11180 REM *****
11200 REM * CALCULO DE LA TEMPERATURA DEL NODO UBICADO EN LA *
11250 REM * SUPERFICIE EXTERIOR DEL HORNO EN EL PLANO Y=0 *
11300 REM * CORRESPONDIENTE AL SUELO *
11310 REM *****
11312 REM
11330 REM *****
11350 REM * NODO 7 *
11380 REM *****
11390 REM
11400 TT=T(I-1,L,Q,J-1)+T(I,L+1,Q,J-1)+T(I,L,Q-1,J-1)
11450 T(I,L,Q,J)=2*FO*TT+T(I,L,Q,J-1)*(1-6*FO-4*B*FO)+4*FO*B*T0
11500 REM *****
11550 REM * CALCULO DE LA TEMP. DE LOS NODOS PARA EL PLANO X=X *
11560 REM * PARA LA UBICACION I=N EN LA SUPERFICIE EXTERIOR. *

```

```

11570 REM *****
11575 REM
11577 REM *****
11580 REM * NODOS 8 *
11590 REM *****
11600 FOR L=1 TO M-1
11650 TT=T(I,L-1,Q,J-1)+T(I,L+1,Q,J-1)+2*T(I-1,L,Q,J-1)+2*T(I,L,Q-1,J-1)
11660 T(I,L,Q,J)=4*F0*B*TO+F0*TT+T(I,L,Q,J-1)*(1-4*F0*B-6*F0)
11675 NEXT L
11730 REM *****
11750 REM * NODO 9 *
11775 REM *****
11800 L=M
11825 TT=T(I,L-1,Q,J-1)+T(I-1,L,Q,J-1)+T(I,L,Q-1,J-1)
11850 T(I,L,Q,J)=2*F0*TT+T(I,L,Q,J-1)*(1-6*F0-6*F0*B)+6*F0*B*TO
11875 REM *****
11900 REM * CALCULO DE LA TEMPERATURA DE LOS NODOS PARA LA *
11950 REM * SUPERFICIE SUPERIOR DEL HORNO EN EL PLANO Y=Y. *
11960 REM * PARA LA UBICACION L=M *
11961 REM *****
11962 REM
11963 REM *****
11965 REM * NODOS 10 *
11975 REM *****
11980 REM
12000 FOR I=1 TO N-1
12050 TT=T(I-1,L,Q,J-1)+T(I+1,L,Q,J-1)+2*T(I,L-1,Q,J-1)+2*T(I,L,Q-1,J-1)
12100 T(I,L,Q,J)=F0*TT+T(I,L,Q,J-1)*(1-6*F0-4*F0*B)+4*F0*B*TO
12150 NEXT I
12160 REM
12165 REM *****
12170 REM * TEMPERATURA DE LOS NODOS EN EL PLANO DE SIMETRIA *
12180 REM * CUANDO Z=0 Y X=0. UBICACION I=0 Y Q=0.VARIANDO L. *
12185 REM *****
12190 REM
12193 REM *****
12195 REM * NODO 11 *
12196 REM *****
12197 I=0
12199 L=M
12200 TT=T(I,L-1,Q,J-1)+T(I+1,L,Q,J-1)+T(I,L,Q-1,J-1)
12225 T(I,L,Q,J)=2*F0*TT+T(I,L,Q,J-1)*(1-6*F0-4*F0*B)+4*F0*B*TO
12300 L=M
12320 REM *****
12325 REM * NODOS 12 *
12350 REM *****
12375 I=0
12380 FOR L=R+1 TO M-1
12390 TT=T(I,L-1,Q,J-1)+T(I,L+1,Q,J-1)+2*T(I,L,Q-1,J-1)+2*T(I+1,L,Q,J-1)
12392 T(I,L,Q,J)=TT*F0+T(I,L,Q,J-1)*(1-6*F0-2*F0*B)+2*F0*B*TO
12394 NEXT L
12399 REM *****
12400 REM * TEMPERATURA PARA LOS NODOS INTERIRES EN AL SIMETRIA *

```

```

12425 REM *          PARA UBICACIONES I Y L SON DIFERENTES DE CERO          *
12430 REM *****
12450 REM
12460 REM          *****
12475 REM          *      NODOS 13      *
12490 REM          *****
12500 FOR I=1 TO N-1
12510 FOR L=R+1 TO M-1
12525 TT=T(I,L-1,Q,J-1)+T(I-1,L,Q,J-1)+T(I+1,L,Q,J-1)+T(I,L+1,Q,J-1)
12540 TT=TT+T(I,L,Q-1,J-1)*2
12550 T(I,L,Q,J)=F0*TT+T(I,L,Q,J-1)*(1-6*F0-2*F0*B)+2*F0*B*TO
12575 NEXT L
12590 NEXT I
12600 FOR I=S+1 TO N-1
12625 FOR L=1 TO R
12650 TT=T(I,L-1,Q,J-1)+T(I-1,L,Q,J-1)+T(I+1,L,Q,J-1)+T(I,L+1,Q,J-1)
12660 TT=TT+T(I,L,Q-1,J-1)*2
12675 T(I,L,Q,J)=F0*TT+T(I,L,Q,J-1)*(1-6*F0-2*F0*B)+2*F0*B*TO
12680 NEXT L
12690 NEXT I
12750 REM
13000 XJ=XJ+1
13100 IF J=0 THEN GOTO 13500
13200 XX=XX+1
13300 IF XX<24 THEN GOTO 14978
13400 XX=0
13450 IF J>0 THEN GOTO 14000
13500 LPRINT"          RESULTADOS DEL CALENTAMIENTO DEL HORNO"
13550 LPRINT" "
13600 LPRINT"          PARA UN ESPACIAMIENTO ENTRE NODOS (METRO) =" ;AX
13650 LPRINT"          CUANDO LOS INCREMENTOS DE TIEMPO EN MINUTOS ES =" ;AQ/60
13700 LPRINT"          SIENDO LAS PROPIEDADES DEL MATERIAL"
13750 LPRINT" "
13760 LPRINT"          CONDUCTIVIDAD DEL LADRILLO EN W/M^K =" ;K
13770 LPRINT"          DENSIDAD DEL LADRILLO EN KG/M3 =" ;PR
13780 LPRINT"          CALOR ESPECIFICO EN J/KG^K =" ;CP
13790 LPRINT"          ABSORTIVIDAD DEL LADRILLO =" ;O
13795 LPRINT" "
13800 LPRINT"          LAS PROPIEDADES DEL COMBUSTIBLE Y SU GAS SON"
13850 LPRINT" "
13860 LPRINT"          PODER CALORIFICO INFERIOR EN J/KG =" ;CPI
13870 LPRINT"          EMISIVIDAD DEL GAS =" ;E
13880 LPRINT"          CALOR ESPECIFICO DEL GAS J/KG^K =" ;CPG
13900 LPRINT"          RELACION AIRE-COMBUSTIBLE =" ;MAC ;
13950 LPRINT"-" ;1
13960 LPRINT"          FLUJO MASICO DEL COMBUSTIBLE EN KG/S =" ;MC
13995 LPRINT"TEMP. DEL GAS SIN INF.HORNO=" ;300+PCI*(1-PT)/((MAC+1)*CPG)
13999 LPRINT" "
14000 FOR Q=0 TO P
14001 LPRINT"          PLANO Z=" ;Q
14005 FOR I=0 TO N
14010 IF I>0 THEN GOTO 14040
14020 LPRINT" NODO" ;I ;

```

```
14030             GOTO 14050
14040             LPRINT"NODO";I;
14050     NEXT I:LPRINT
14775 FOR L=0 TO 8
14800 FOR I=0 TO 9
14825 LPRINT USING"#####.#";T(I,L,Q,J);
14850 NEXT I:LPRINT
14875 NEXT L
14950 LPRINT" "
14965 NEXT Q
14966 LPRINT" "
14967 IF J=0 THEN GOTO 14978
14968 LPRINT" CALOR QUE ENTRA A LOS NODOS POR RADIACION Y CONVECCION"
14969 LPRINT" "
14970     FOR Q=0 TO P
14971         FOR I=0 TO R+S
14972             LPRINT USING"#####.#";QT(I,Q);
14973         NEXT I:LPRINT
14974     NEXT Q
14975 LPRINT" "
14976 LPRINT"EL TIEMPO CORRIDO EN MINUTOS ES DE";AQ*XJ/60
14978     FOR Q=0 TO P
14988         FOR L=0 TO M
14989             FOR I=0 TO N
14990                 T(I,L,Q,0)=T(I,L,Q,J)
14991             NEXT I
14992         NEXT L
14993     NEXT Q
14994 J=0
15000 IF T(0,R+1,0,J)<1000 THEN GOTO 470
15050 END
```

CAPITULO VI

PRESENTACION DE RESULTADOS

6.1 SOLUCION UNIDIMENSIONAL

CONDUCTIVIDAD CONSTANTE

VALIDACION DE RESULTADOS

Se comprueba que el programa da los resultados esperados calculando la temperatura del gas para un tiempo dado; A partir de la ecuación general de esta dada en el modelo matemático. Así:

$$T_G = T_{\infty} + \frac{P_{Cl} * (1 - P_T)}{(MAC + 1) * CPG} - \frac{Q_T}{(MAC + 1) * MC * CPG}$$

$T_{\infty} = \frac{P_{Cl} * (1 - P_T)}{(MAC + 1) * CPG}$, es la temperatura que el gas alcanzaría si no existiera intercambio con la pared y es un valor fijo. En este caso, para diesel se tienen 1631.29K.

Q_T , es el calor transferido a la pared desde el gas y se calcula con la temperatura de la pared al tiempo anterior, viene dada por:

$$Q_T = \delta \cdot F \cdot A (E \cdot T_G^4 - 0 \cdot T_w^4) + H \cdot A (T_G - T_w)$$

Para tiempo cero, evaluando Q_T con la temperatura de la pared a cero menos, que es 300°K y con $T_G = 757.8^\circ\text{K}$.

El área de intercambio viene dada por :

$$A = 2.3 \cdot 1 \text{ m}^2$$

El factor de forma en este caso es: 0.5

$$Q_T = 5.67 \cdot 0.5 \cdot 2.3 (.85 \cdot 7.578^4 - .8 \cdot 3^4) + 10 \cdot 2.3 (757.8 - 300)$$

$$Q_T = 6.5205 \cdot 2738.2 + 23 \cdot 457.8 \text{ (W)}$$

$$Q_T = 28383.8 \text{ W.}$$

$$(MAC+1) \cdot MC \cdot CPG = (19+1) \cdot 1170 \cdot 5 / 3600$$

$$= 20 \cdot 1170 \cdot 5 / 3600$$

$$= 32.5 \text{ W/°K}$$

El término en la ecuación de la temperatura del gas que contiene a Q_T es entonces:

$$Q_T / (MAC+1) MC \cdot CPG = 28383.8 / 32.5$$

$$= 873.3^\circ\text{K}$$

De donde:

$$T_G = 1631.2 - 873.3 \text{ (°K)}$$

$$T_G = 757.8^\circ\text{K}$$

La temperatura anterior corresponde al tiempo cero, para el tiempo siguiente, 1, se tendrá:

$$QT=6.5205*(2803-66.722)+23*(757.8-302.2)$$

$$QT=28321.3 \text{ W}$$

El denominador del término es igual al anterior, por tanto:

$$QT/(MAC+1)*CPG*MC=28321.3/32.5$$

$$=871.42K$$

Y la temperatura del gas para el tiempo posterior será:

$$TG=1631.2-871.4 \text{ (}^{\circ}\text{K)}$$

$$TG=759.8 \text{ }^{\circ}\text{K}$$

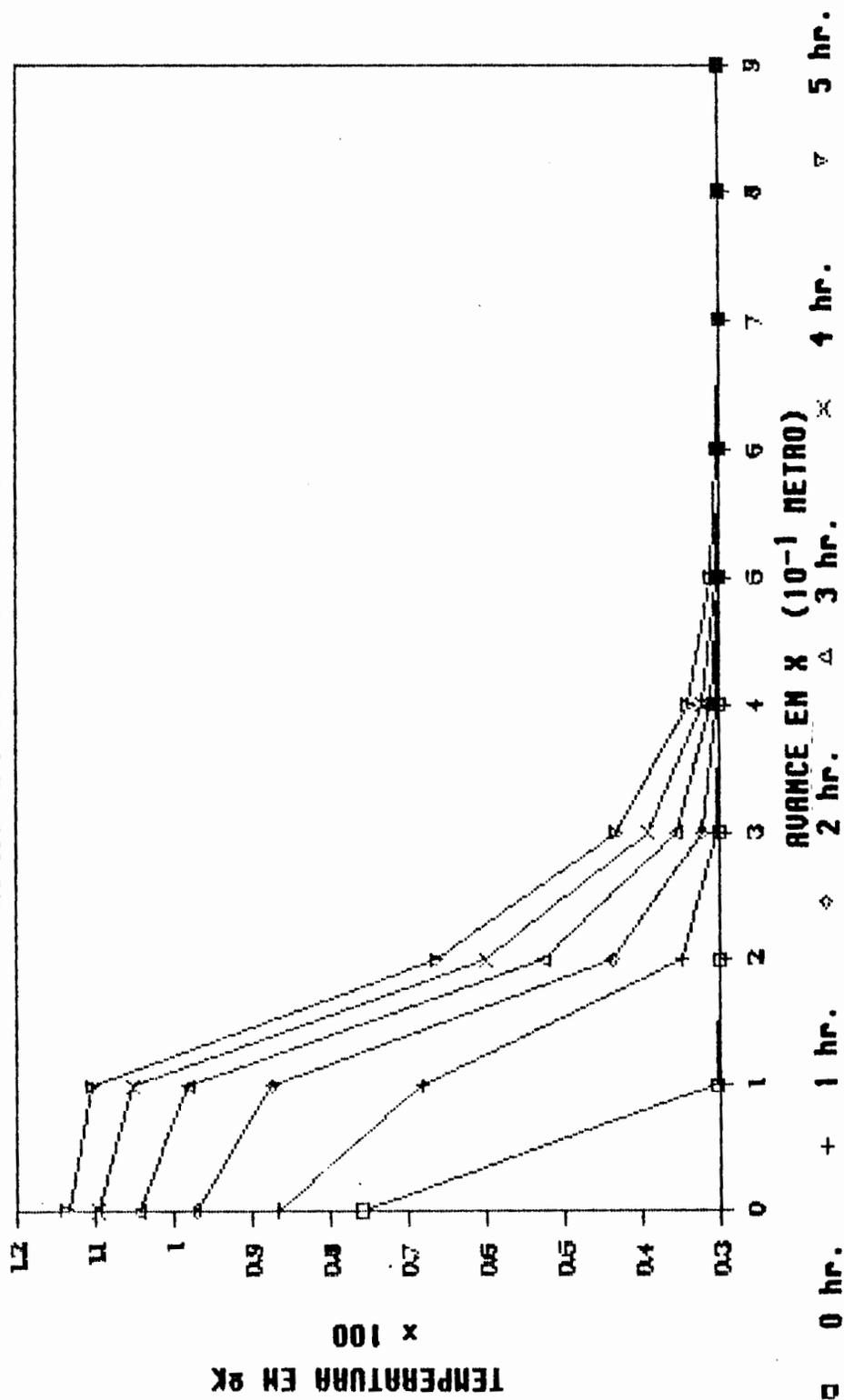
Los resultados aquí obtenidos se equiparan perfectamente con los encontrados por el programa. Ver apéndice B.

GRAFICOS:

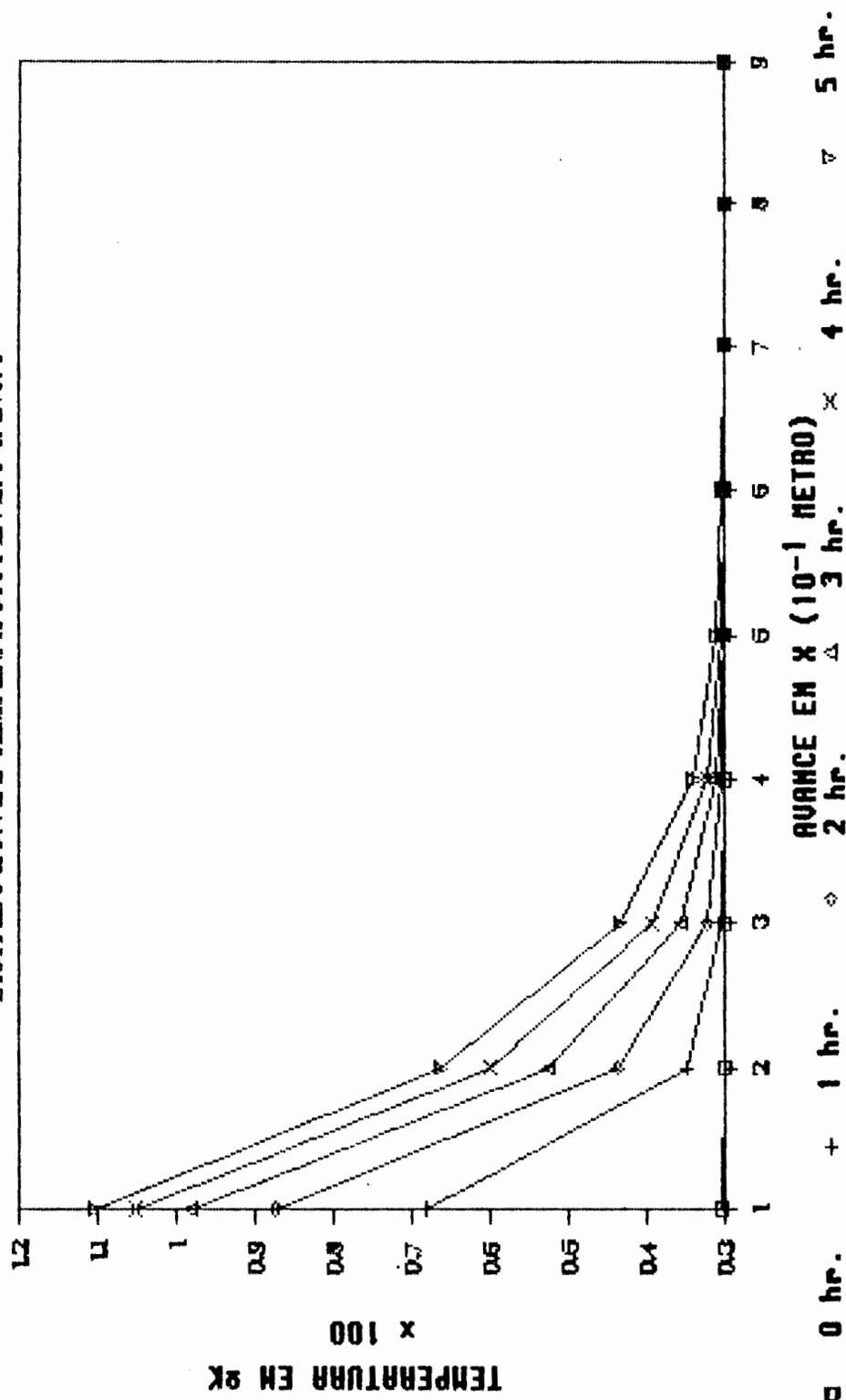
En la siguiente sección se muestra gráficos del comportamiento de la temperatura del horno cuando se lo trata unidimensionalmente. Los gráficos se encuentran divididos en dos grupos: para conductividad constante y para conductividad variable.

Tratamiento unidimensional

DISTRIB. DE TEMP. GAS Y CARGA

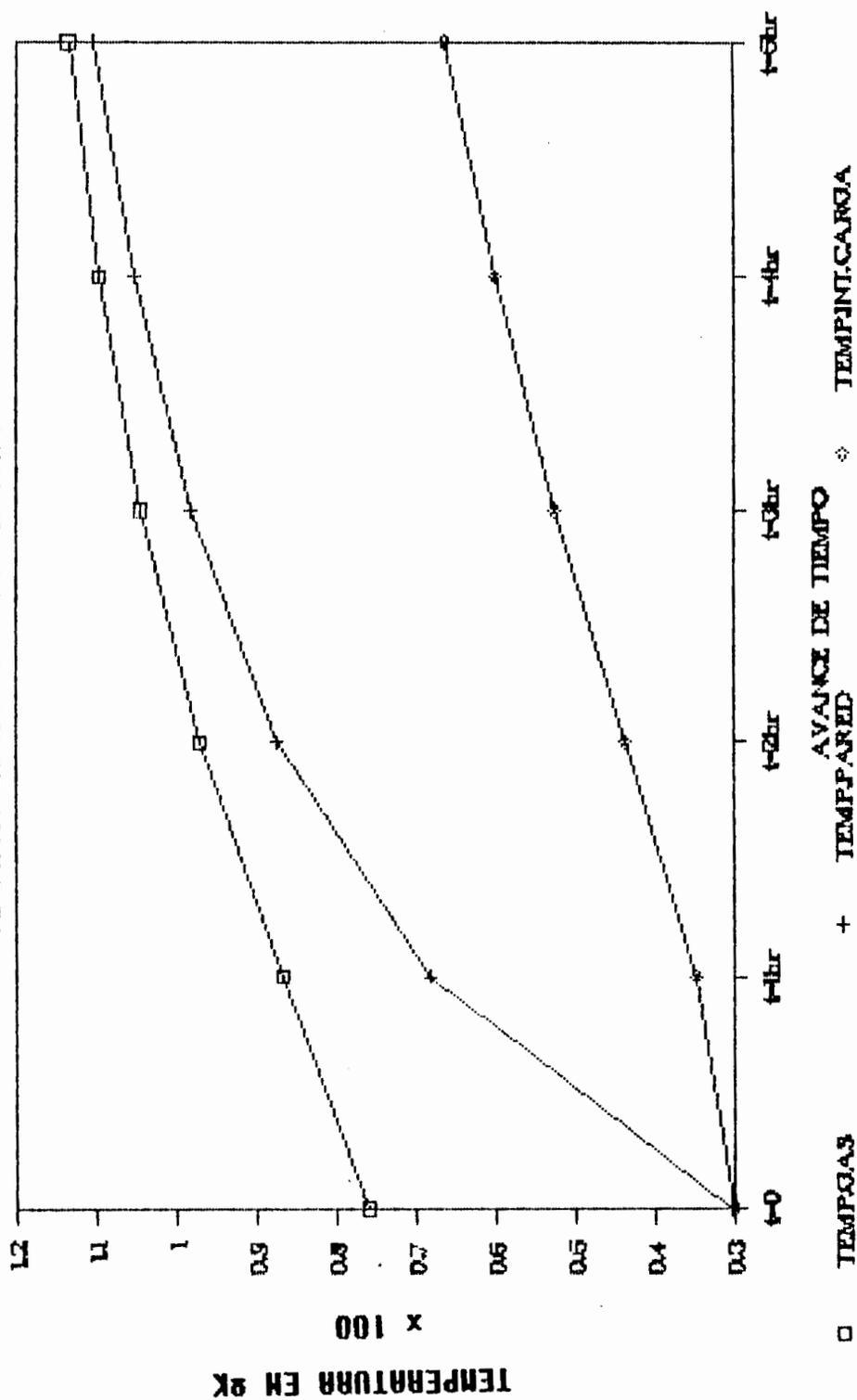


Tratamiento unidimensional
DISTRIBUCION DE TEMPERATURA EN LA CARGA



Tratamiento unidimensional

VARIACION DE LA TEMP. CON EL TIEMPO



CONDUCTIVIDAD VARIABLE

VALIDACION DE RESULTADOS

La comprobación de los resultados se la realiza de la misma forma que en el caso anterior, a partir de la ecuación de la temperatura del gas.

Se puede comparar a partir de los resultados pues, se tiene la temperatura que se pierde por el calor transferido a la pared. Esta temperatura más la del gas a tiempo posterior, dará la temperatura máxima del gas que corresponde a cuando no intercambia calor con la pared. Así, para tiempo cero se tiene;

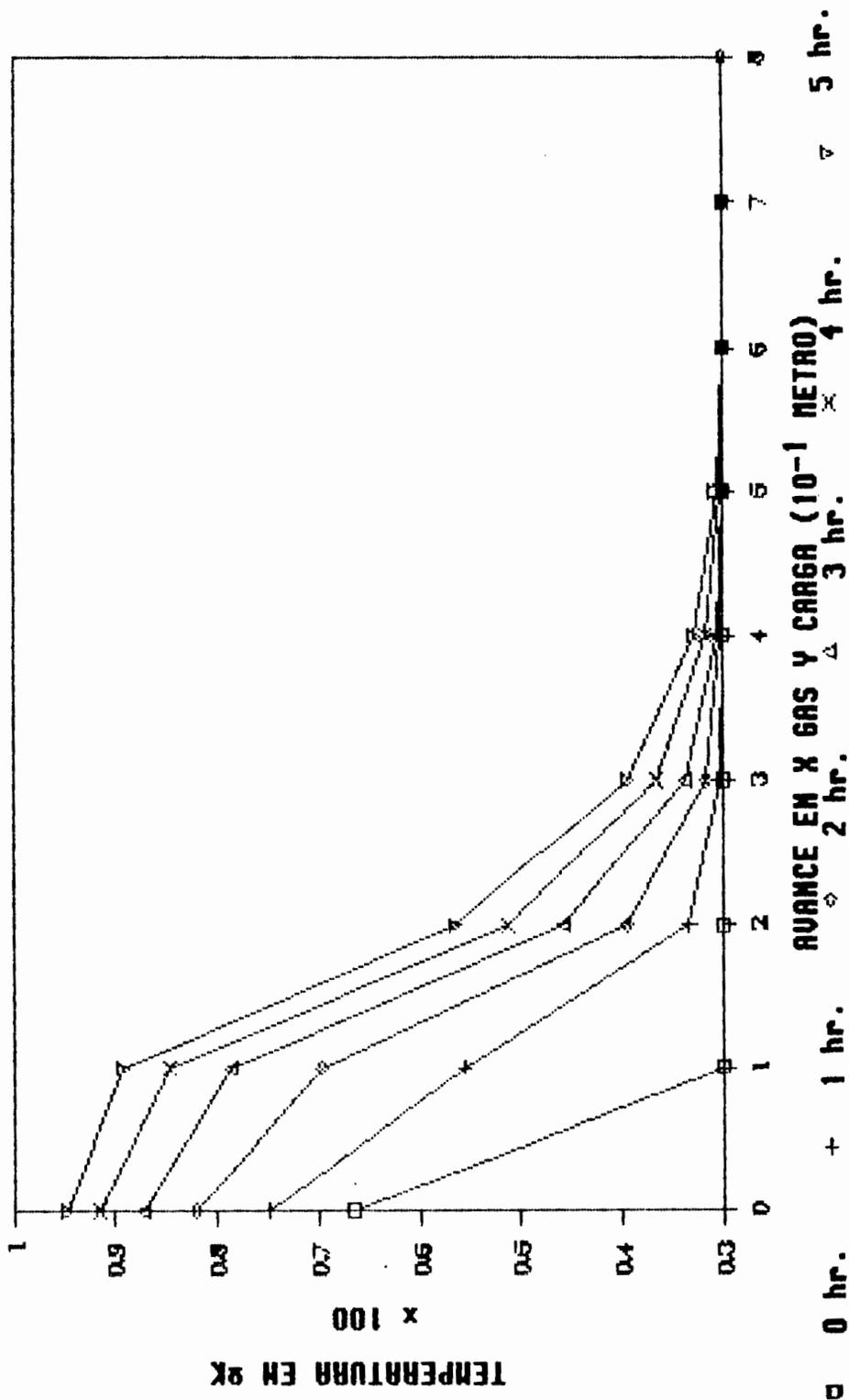
$$T_{QT} + T_G = 1631.1 \text{ K}$$

Hay una diferencia de 0.1 en la temperatura lo que se debe a que T_{QT} es la evaluada al tiempo actual. Si se evaluara al tiempo anterior es decir a cero menos a 300 K. Se obtendrá con exactitud la temperatura.

Los resultados se han impreso cada 30 minutos y los espaciamentos de tiempo son de 2.5 minutos. Se puede registrar variación si se suma los resultados en esta secuencia pues, corresponden a muestreo muy lejanos.

Tratamiento unidimensional

COND. VARIABLE & FLUJO COMB. 300 G/HR



Tratamiento unidimensional

COND. VARIABLE & FLUJO COMB. 3KG/HR

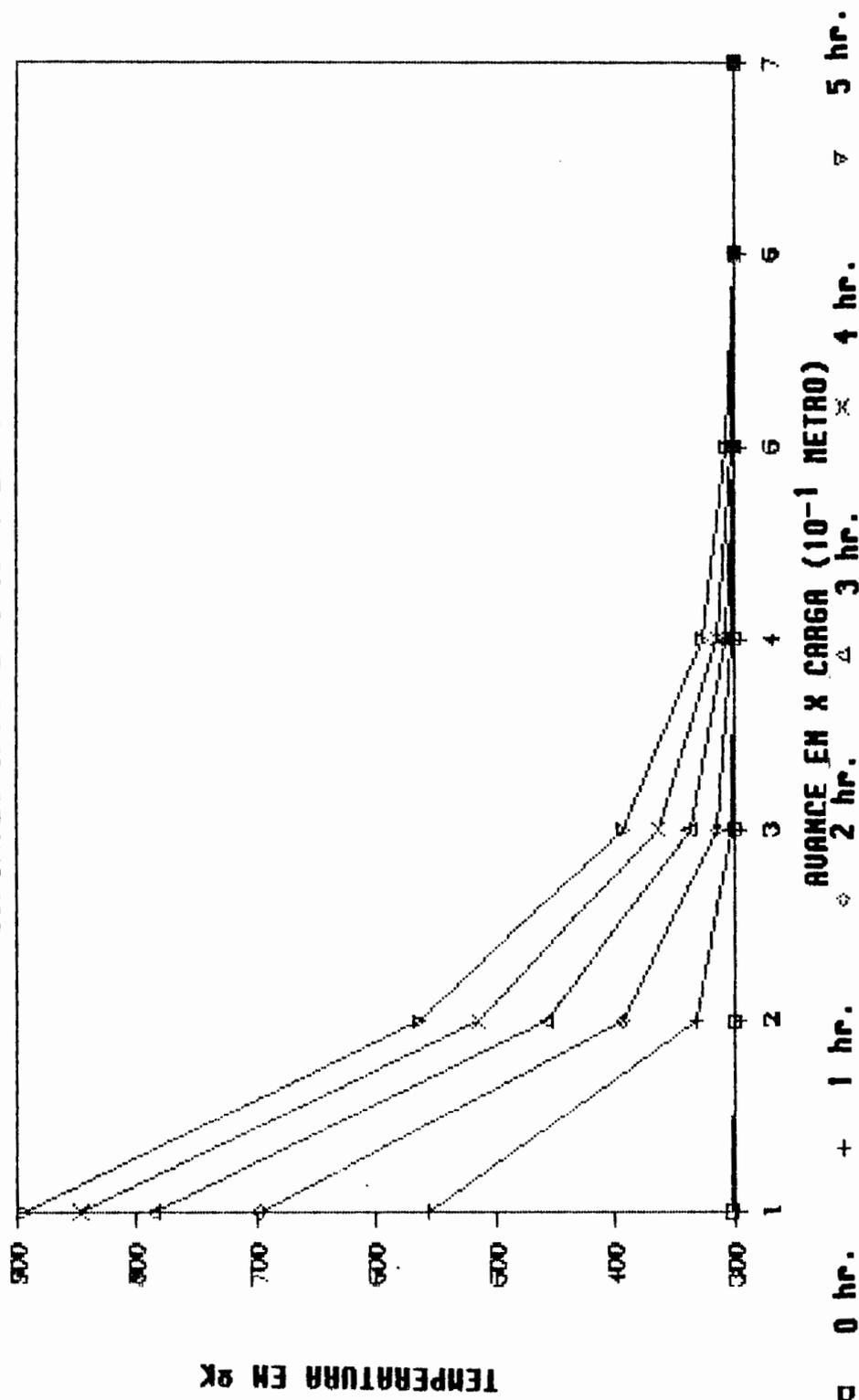
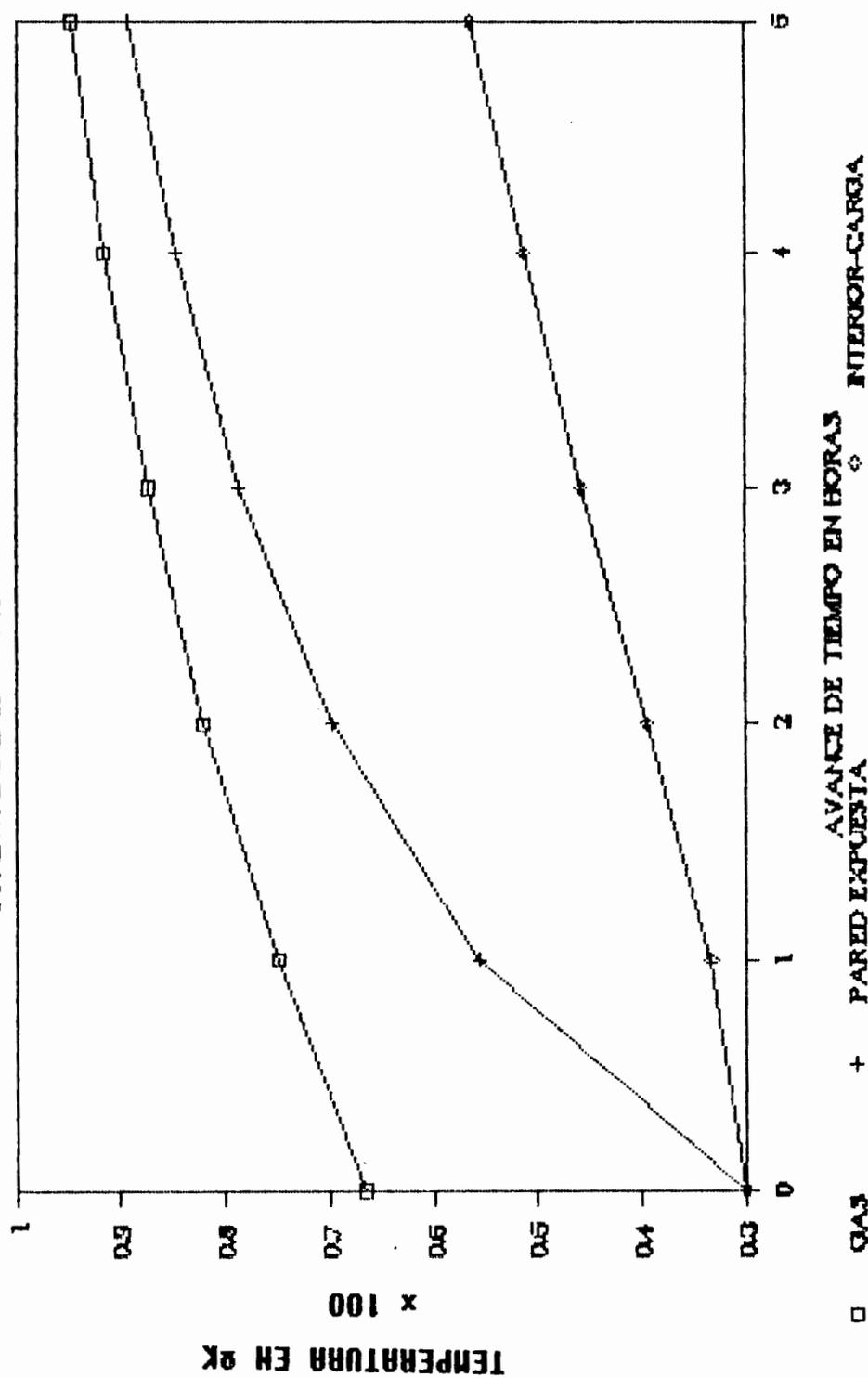


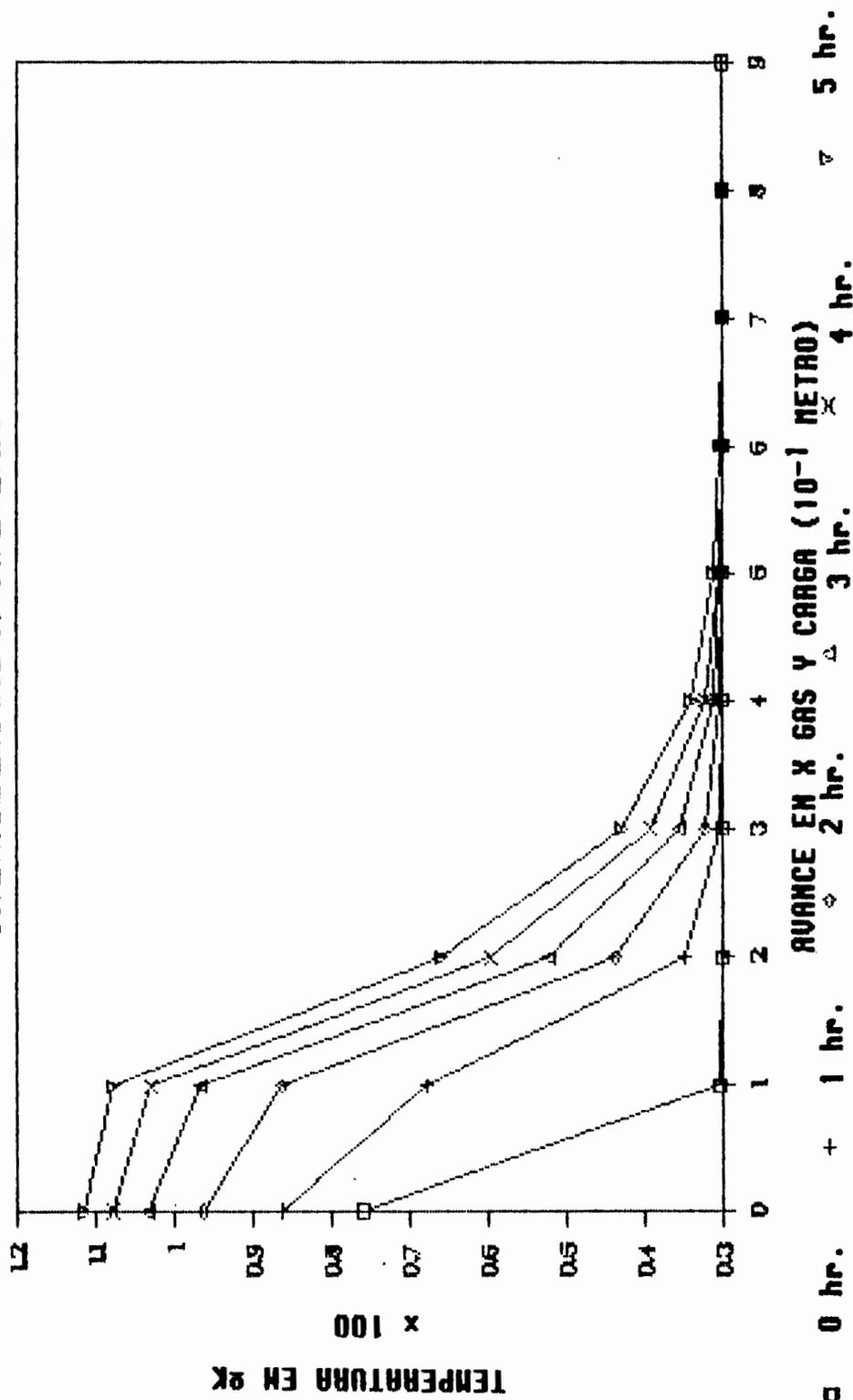
GRAFICO 6.1.6

Tratamiento unidimensional CON VARIABLE & FLUJO COMB. 300/HR



Tratamiento unidimensional

COND. VARIABLE & FLUJO COMB. 600/HR



Tratamiento unidimensional

COND. VARIABLE & FLUJO COMB. 8KG/HR

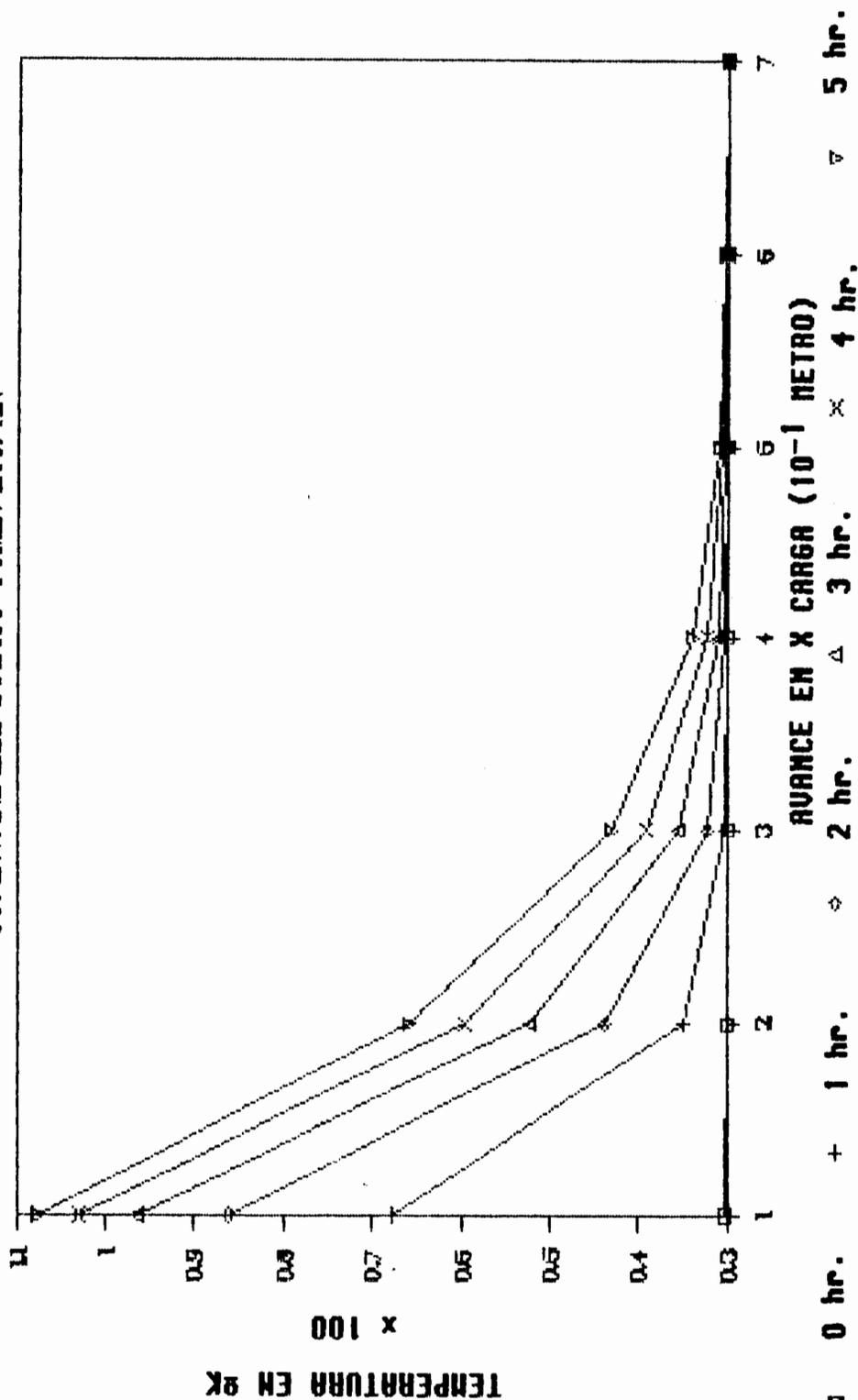
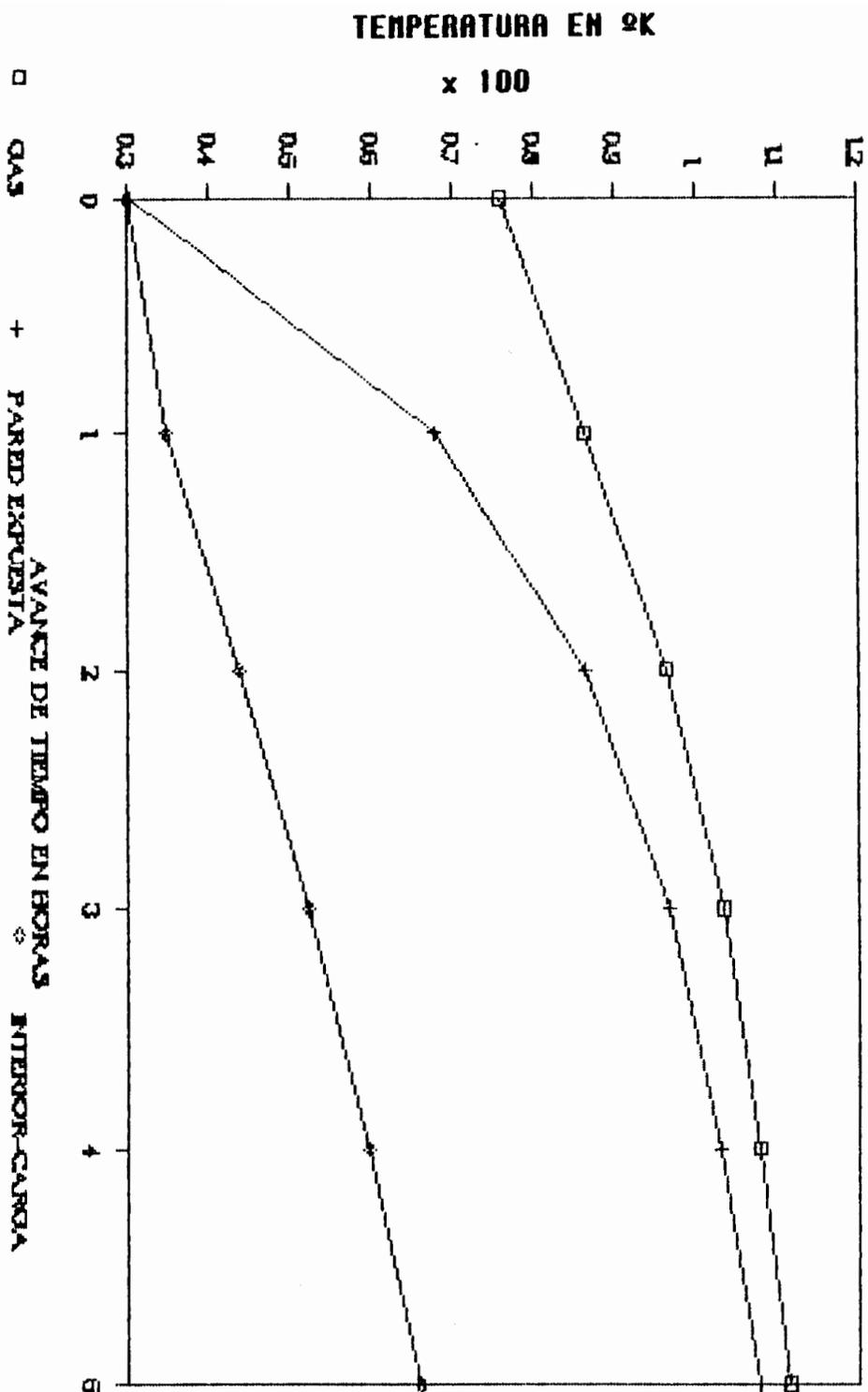


GRAFICO 6.1.9

Tratamiento unidimensional

COMBUSTIBLE & FLUIDO COMB. 800/HR



6.2 SOLUCION BIDIMENSIONAL

CONDUCTIVIDAD CONSTANTE

VALIDACION DE RESULTADOS

Para comprobar los resultados se sigue el mismo procedimiento anotado en las secciones anteriores. Así:

Para este caso se tiene los calores que estan entrando a cada nodo expuesto a la llama y, se los suma para encontrar el calor total entregado por el gas a la pared. Con el calor así obtenido se calcula la temperatura perdida por el gas.

$$QT = \sum_{i=1}^n QT_{(i)}$$

$$QT = 770.8 + 1585.9 + 2017.2 + 1537.8 + 1585.7 + 767.2$$

$$QT = 8264.6 \text{ W}$$

$$(MAC+1)CPG*MC = 20*1170*3/3600 = 19.5 \text{ W/}^{\circ}\text{K}$$

Luego:

$$QT/(MAC+1)*CPG*MC = 423.8^{\circ}\text{K}$$

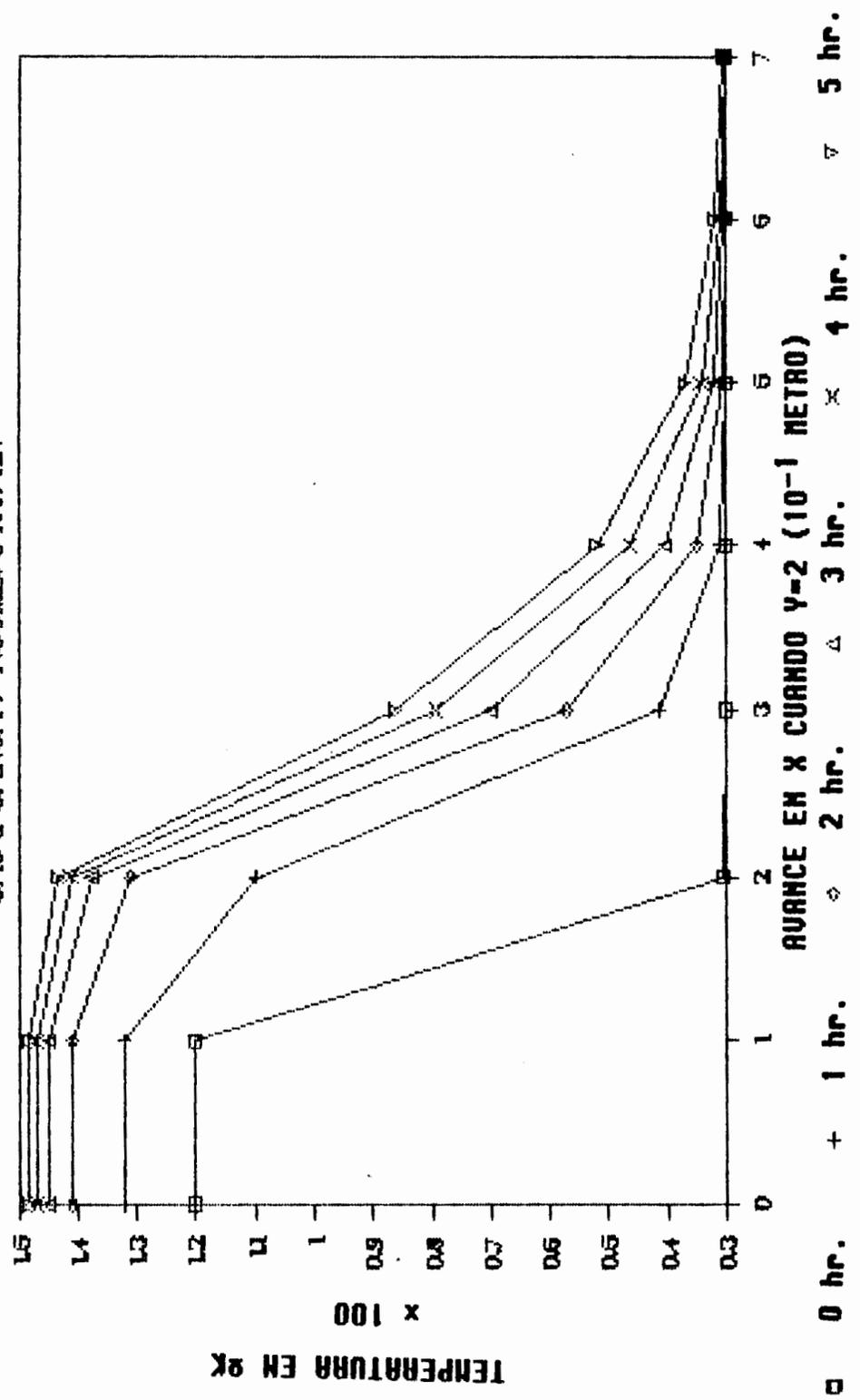
$$TG = 1200.6 + 423.8 \text{ }^{\circ}\text{K}$$

$$TG = 1624.4 \text{ }^{\circ}\text{K}$$

GRAFICO 6.2.1

Tratamiento bidimensional

GAS & CARGA / P.COMB. 5 KG/HR



Tratamiento bidimensional

FLUJO MASICO DE COMBUSTIBLE 6 KG/HR

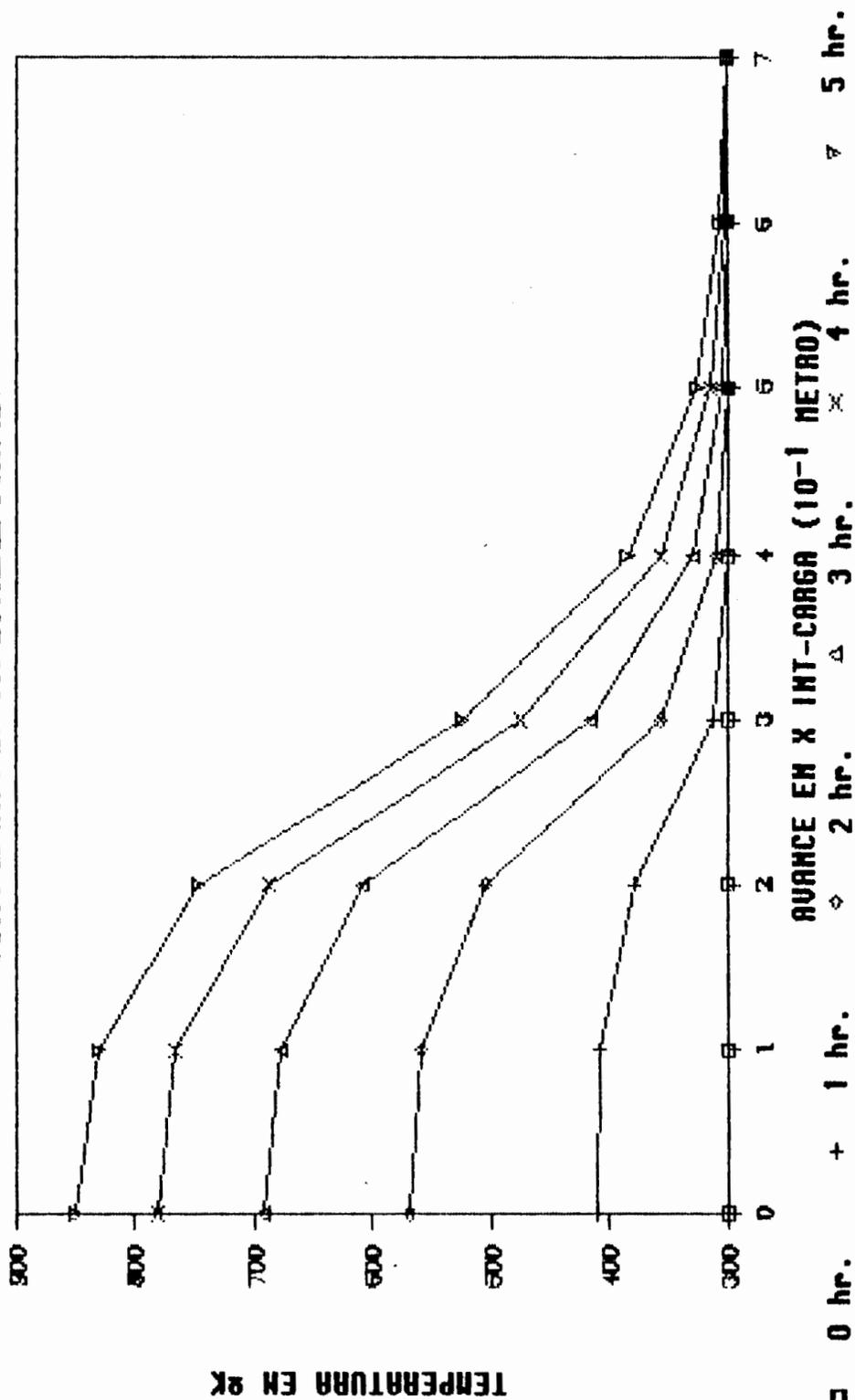
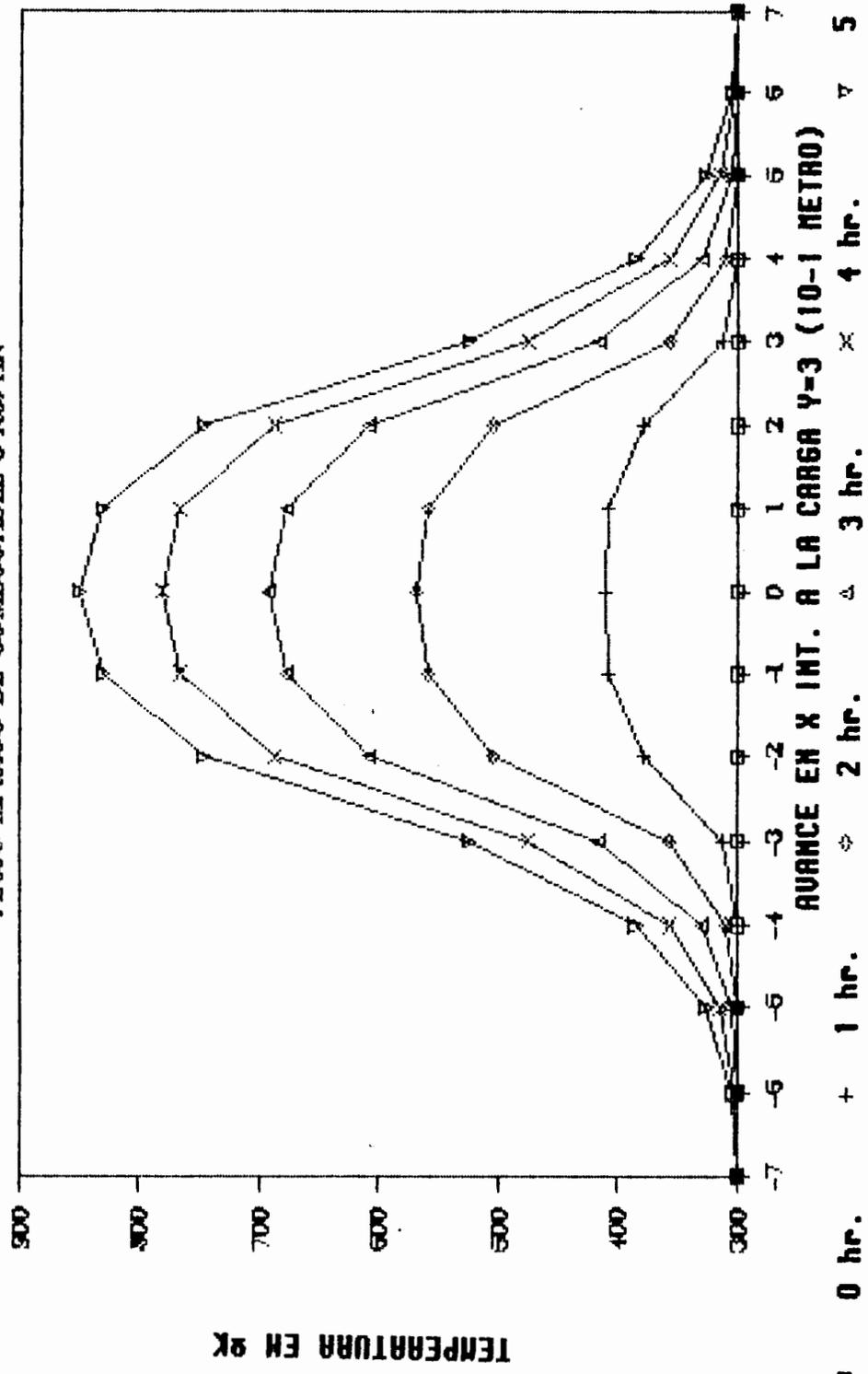


GRAFICO 6.2.3

Tratamiento bidimensional

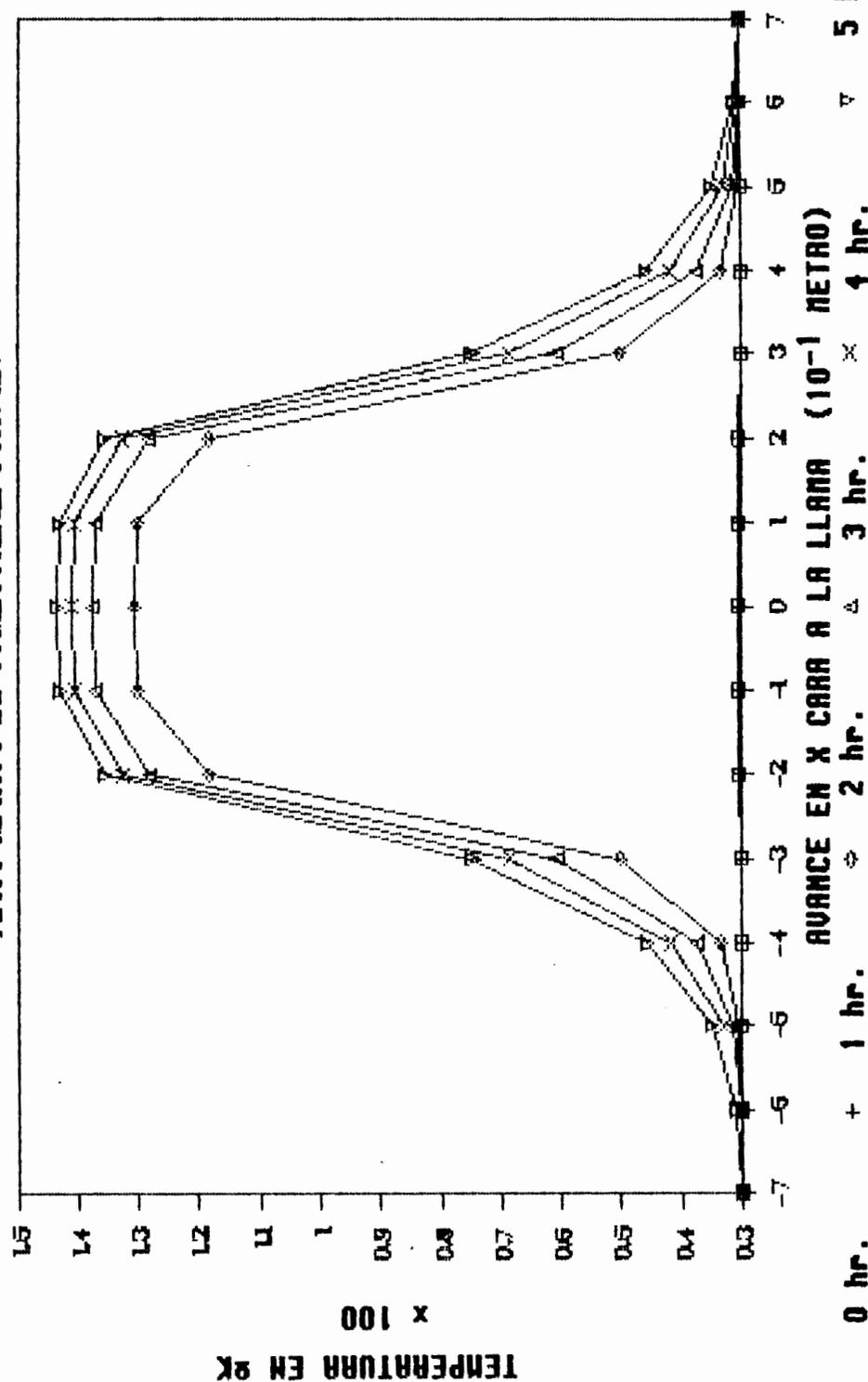
FLUJO MASICO DE COMBUSTIBLE 5 KG/HR



TEMPERATURA EN 9K

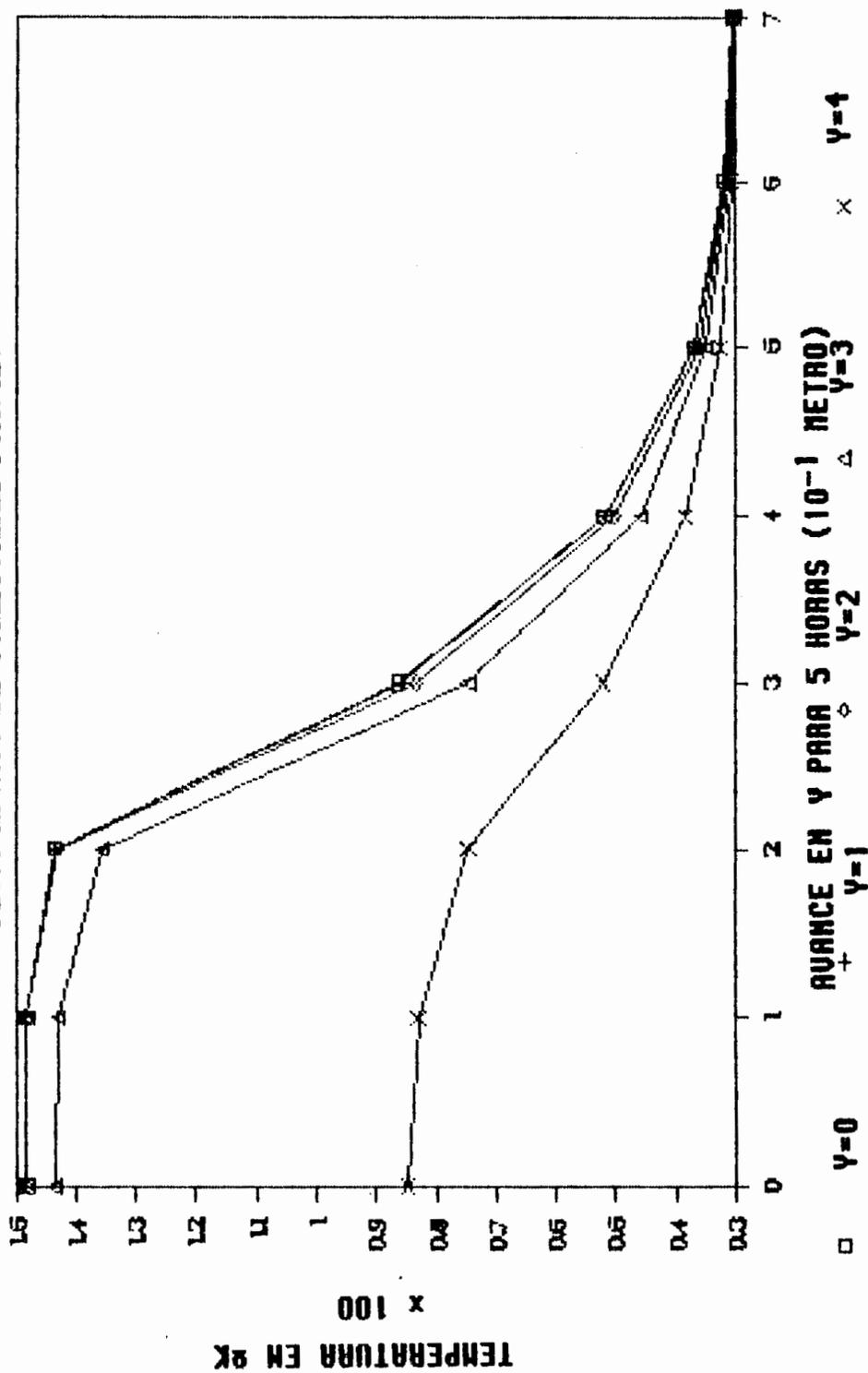
Tratamiento bidimensional

FLUJO MASICO DE COMBUSTIBLE 5 KG/HR



Tratamiento bidimensional

FLUJO MASICO DE COMBUSTIBLE 6 KG/HR



Tratamiento bidimensional

FLUJO MASICO DE COMBUSTIBLE 5 KG/HR

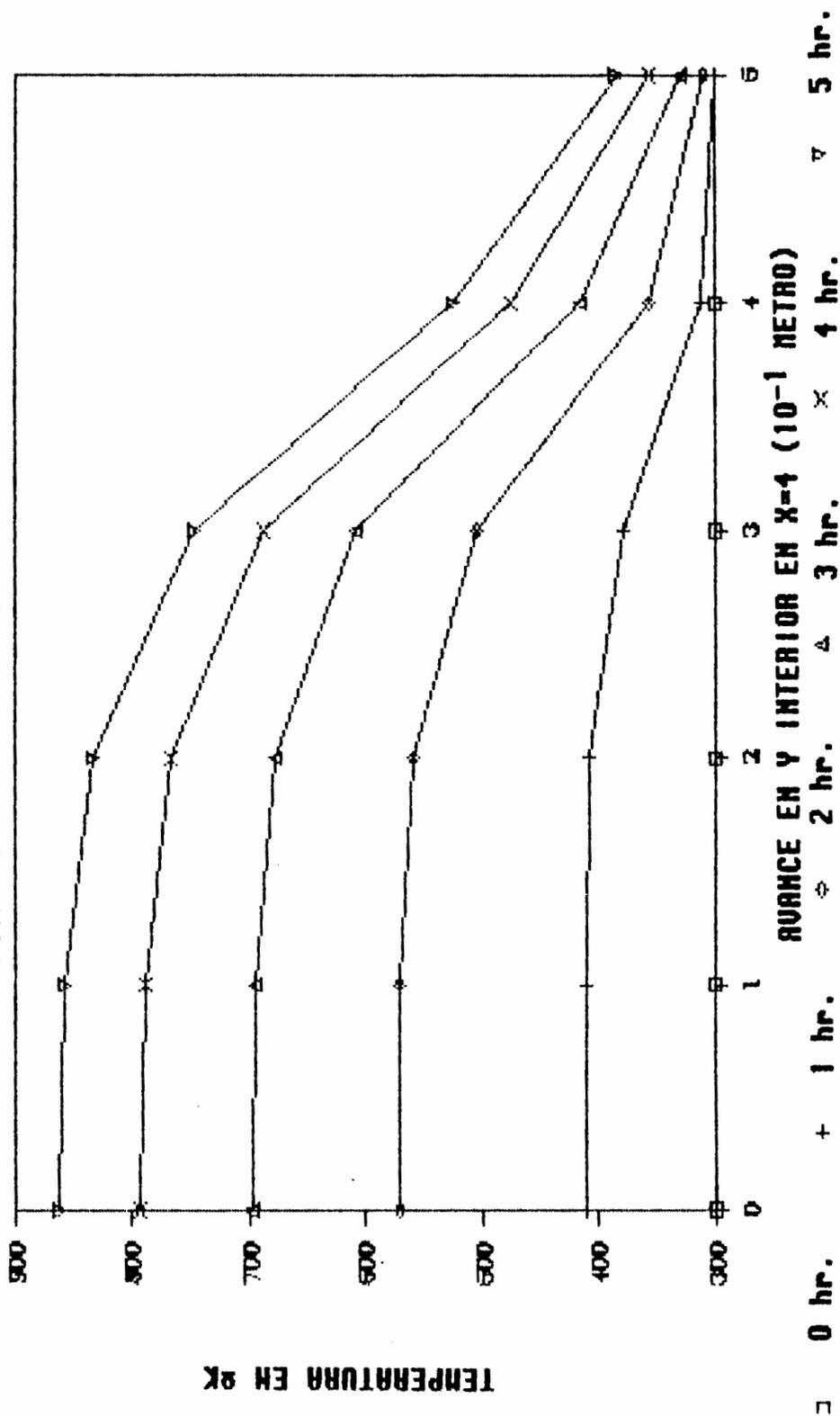
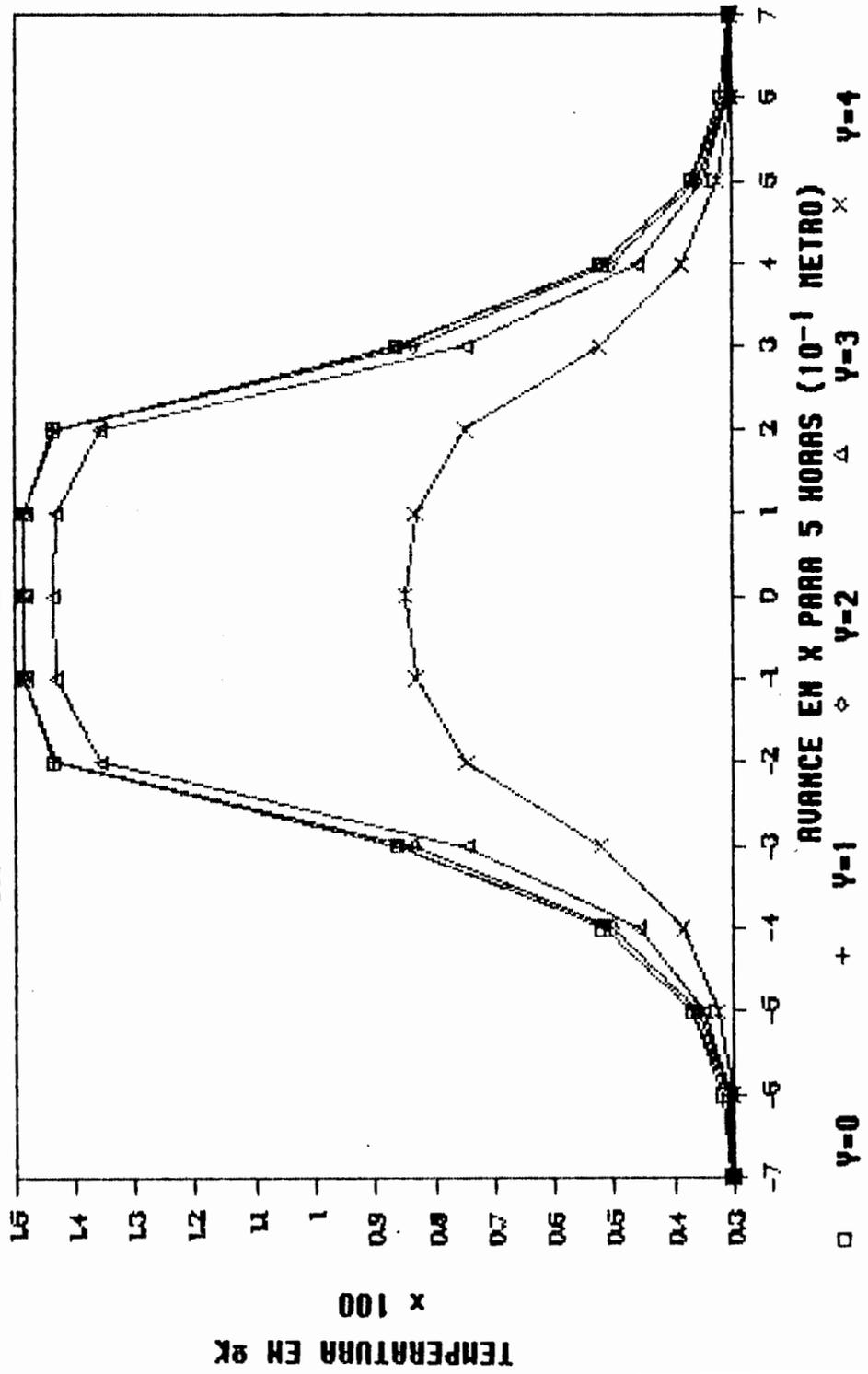


GRAFICO 6.2.7

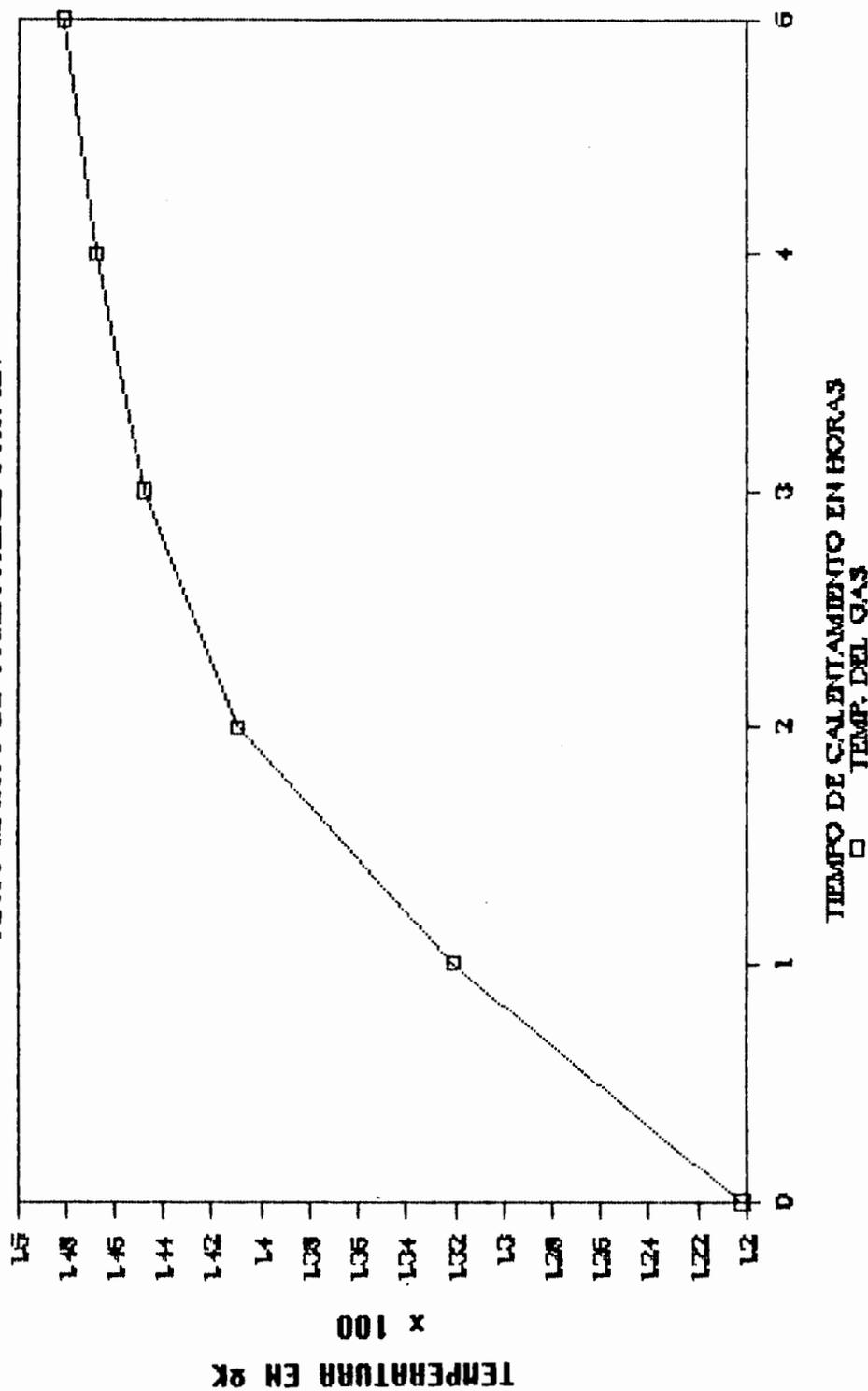
Tratamiento bidimensional

FLUJO MASICO DE COMBUSTIBLE 5 KG/HR



Tratamiento bidimensional

FLUJO MASICO DE COMBUSTIBLE 6 KG/HR



□ TIEMPO DE CALENTAMIENTO EN HORAS

6.3 SOLUCION TRIDIMENSIONAL

CONDUCTIVIDAD CONSTANTE

VALIDACION DE RESULTADOS

Para comprobar los resultados se procede igual que en el caso bidimensional. La temperatura del gas está dada por la temperatura sin la presencia de la llama menos la temperatura perdida debido al calor transferido a la pared dividido para la masa de el gas y por el calor específico de este.

La temperatura del gas es variable a lo largo de Z. por lo que, cuando se saca la temperatura máxima de este es referida a la temperatura de el avance en Z anterior.

Para el plano Z=4 se tiene que el calor transferido por el gas a la pared es:

$$QT = \sum_{i=1}^n QT_{(i)}$$

$$QT = 99.1 + 208.8 + 337.4 + 197.4 + 208.8 + 98.4 \text{ (W)}$$

$$QT = 1149.4 \text{ W}$$

$$(MAC+1) * PCG * MC = 32.5 \text{ W/°K}$$

$$QT / (MAC+1) * PCG * MC = 35.38 \text{ °K}$$

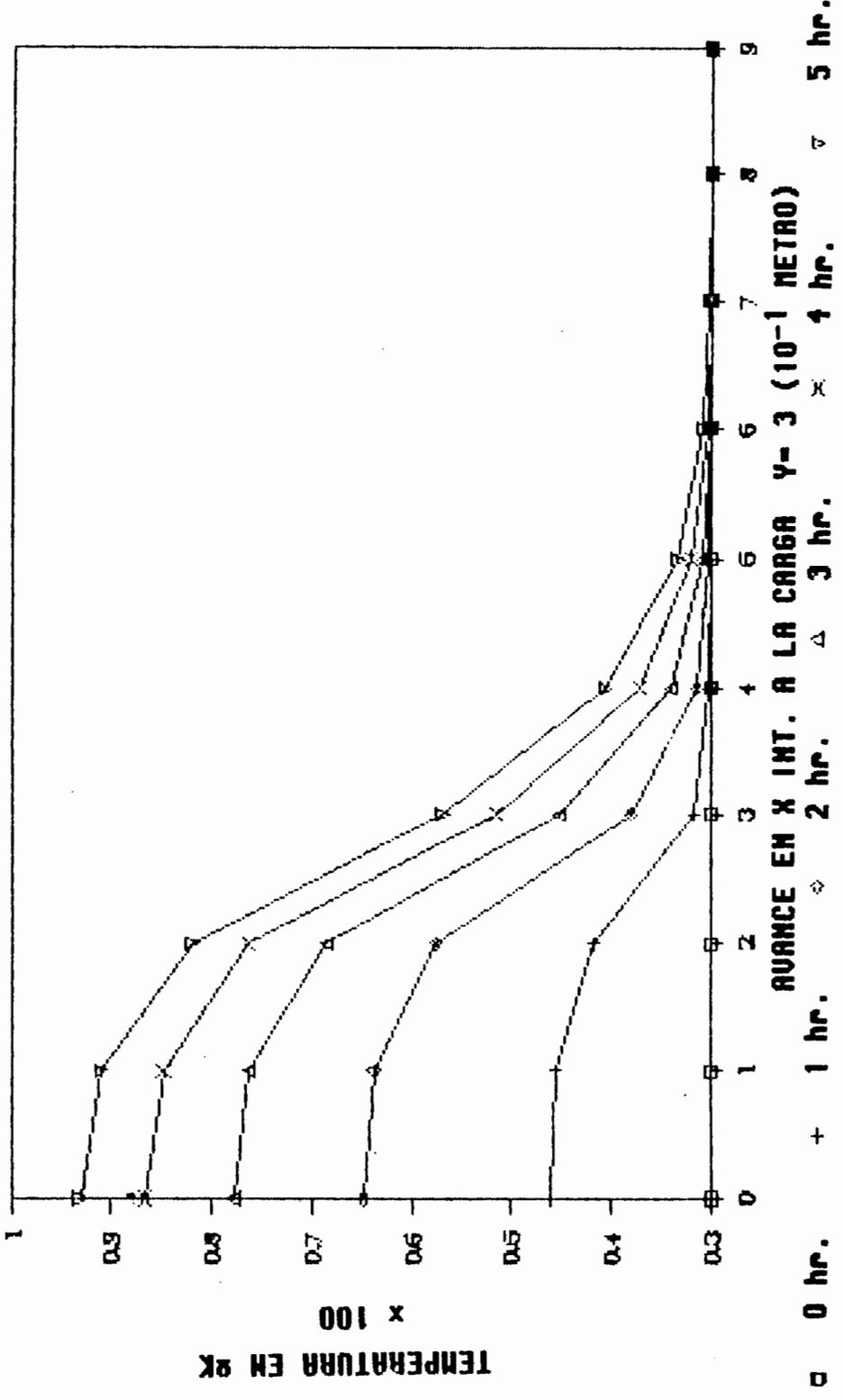
$$TG = 1524 - 35.38 = 1488.6 \text{ °K}$$

Se prosigue así, calculando para los otros tiempos y posiciones de Z.

GRAFICOS

Los gráficos presentados en esta sección se dividen de acuerdo al plano de corte considerado, X, Y o Z. Así como, También, se en función del tiempo de calentamiento.

GRAFICO 6.3.1
 Tratamiento tridimensional
 CORTE EN EL PLANO DE SIMETRIA Z=0



□ 0 hr. + 1 hr. ◇ 2 hr. △ 3 hr. × 4 hr. ▽ 5 hr.

Tratamiento tridimensional

CORTE EN EL PLANO DE SIMETRIA Z=0

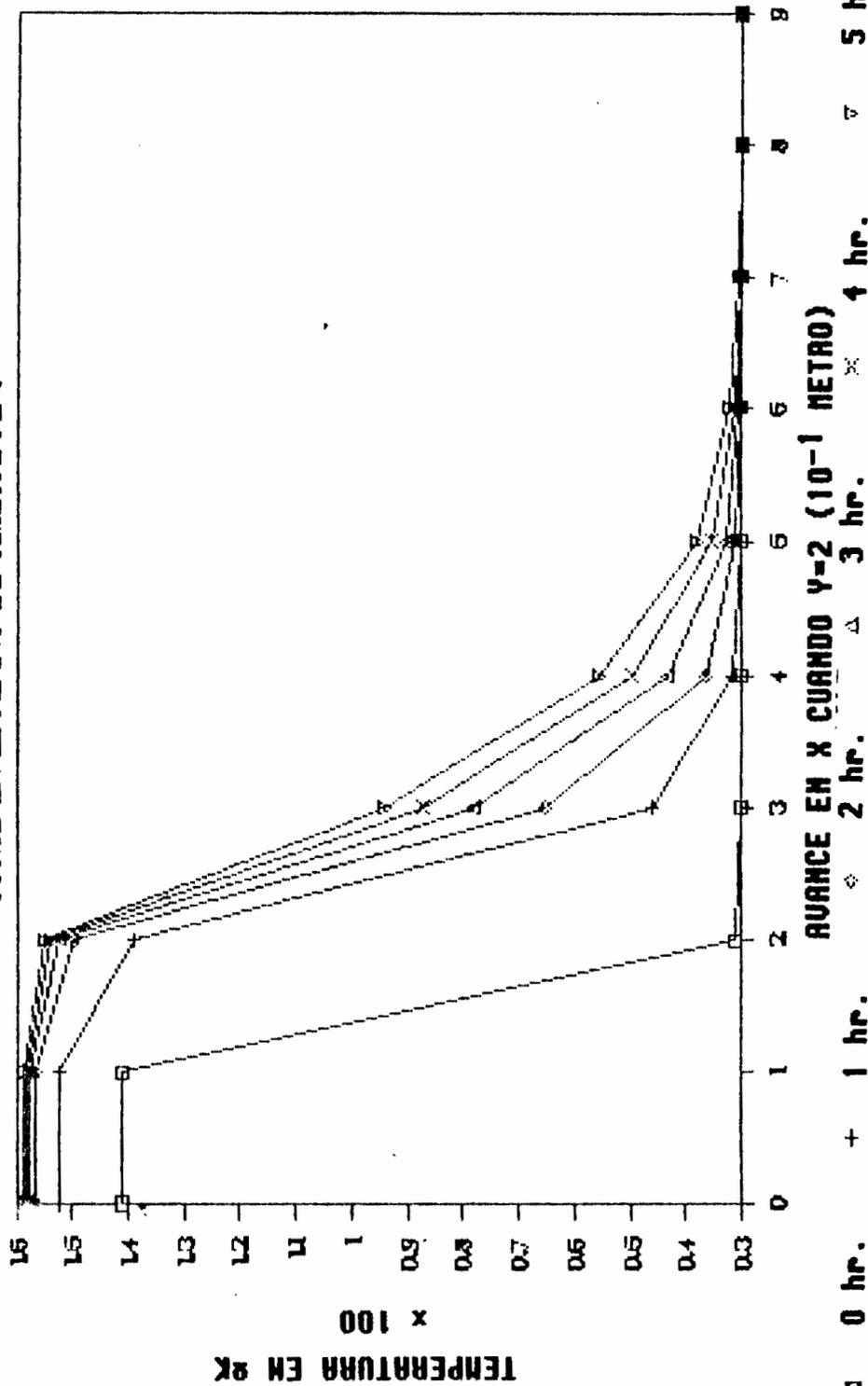
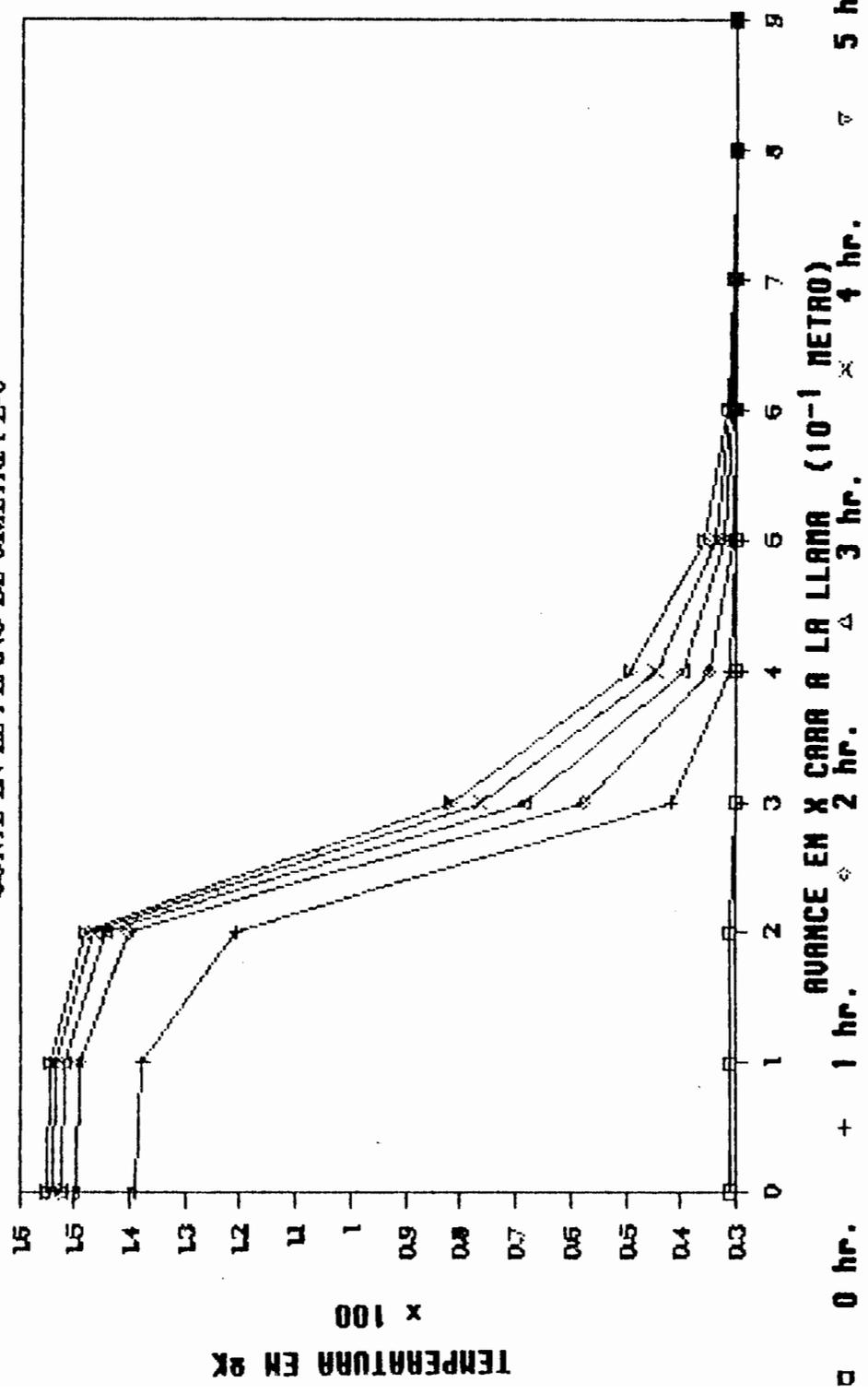


GRAFICO 6.3.3

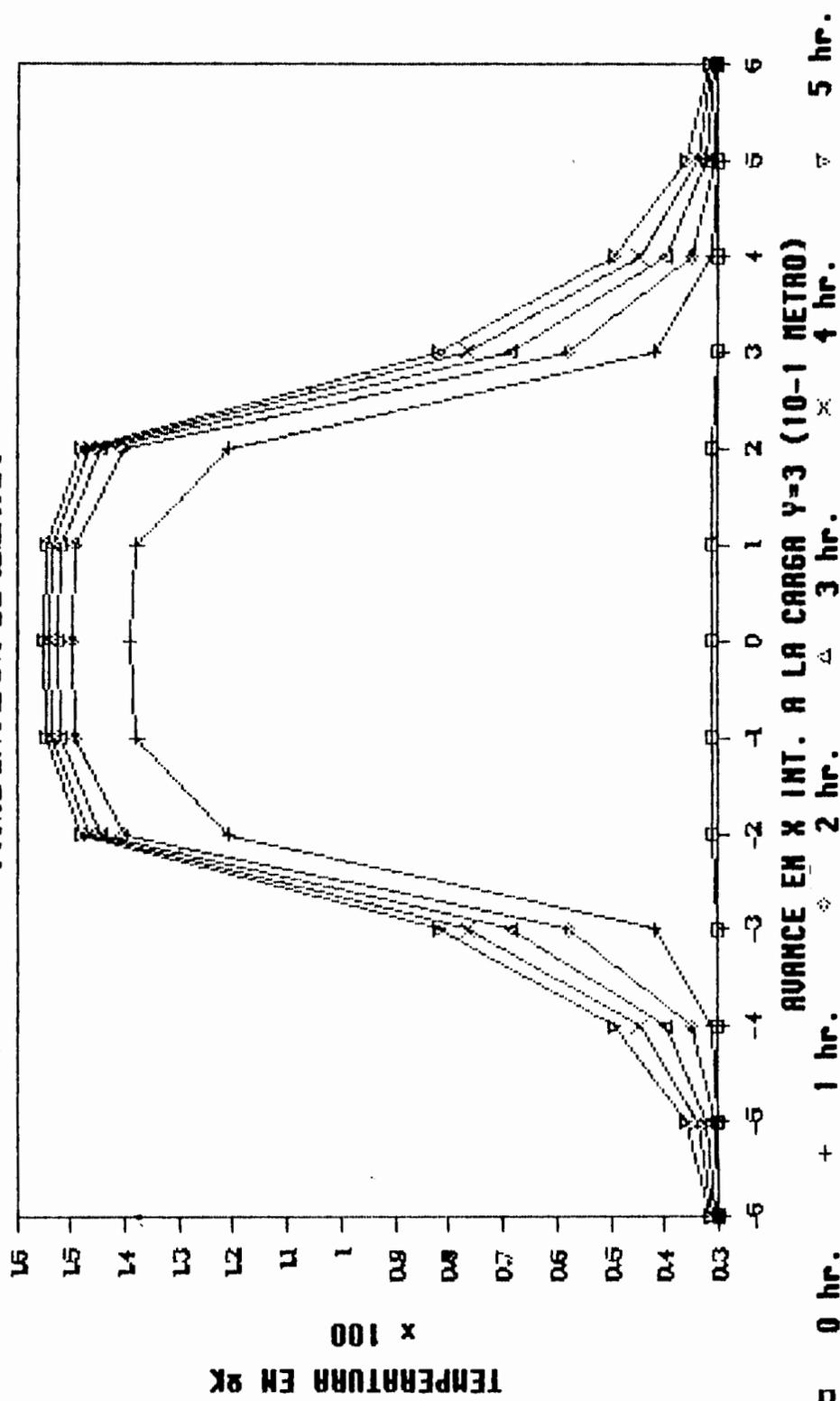
Tratamiento tridimensional

CORTE EN EL PLANO DE SIMETRIA Z=0



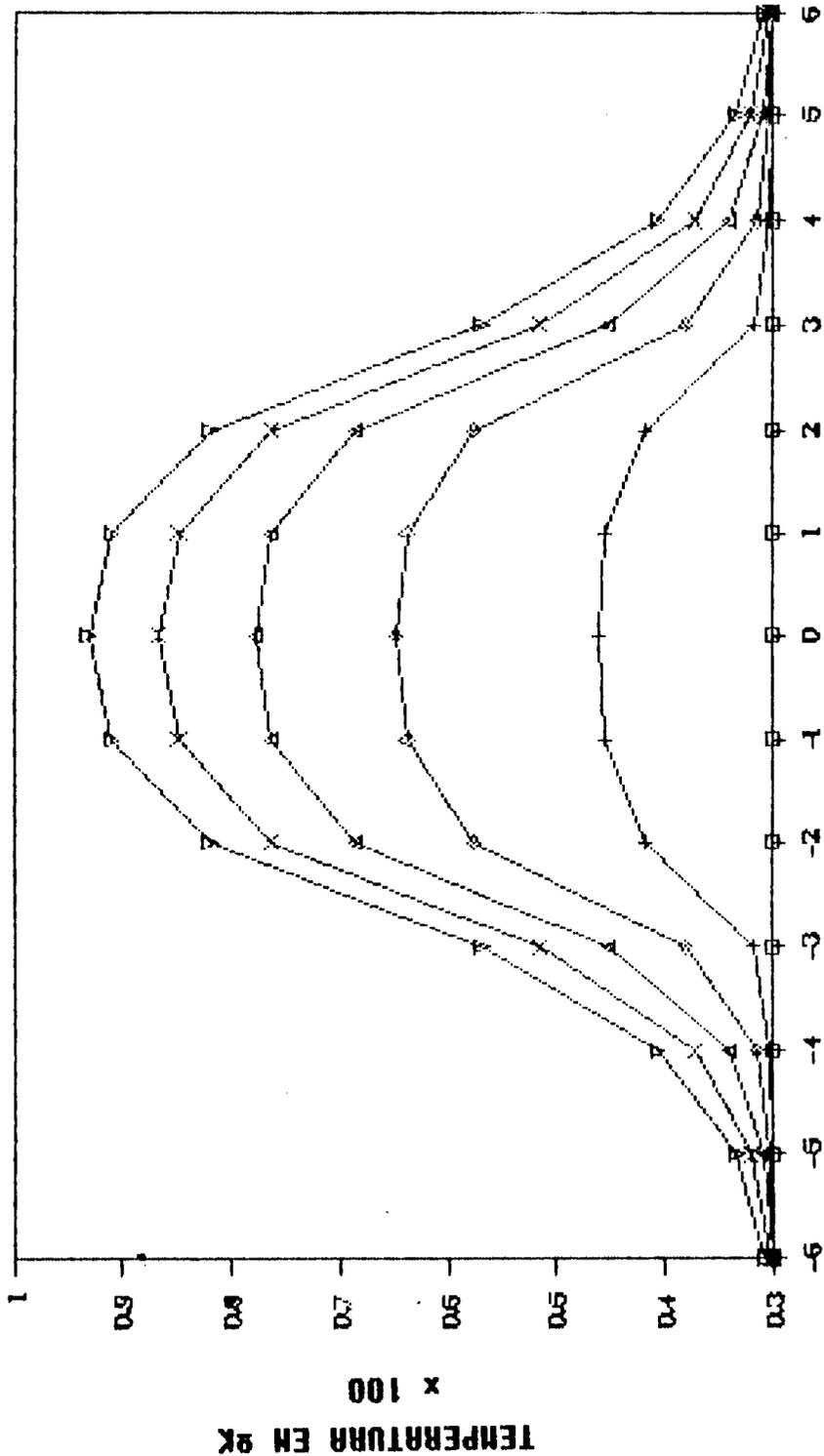
Tratamiento tridimensional

CORTE EN PLANO DE SIMETRIA



Tratamiento tridimensional

CORTE EN PLANO DE SIMETRIA



□ 0 hr. + 1 hr. ◇ 2 hr. x 4 hr. ▽ 5 hr.
 AVANCE EN X INT. A LA CARGA Y=3 (10-1 METRO)

Tratamiento tridimensional

CORTE EN UN PLANO INTERIOR EN Z

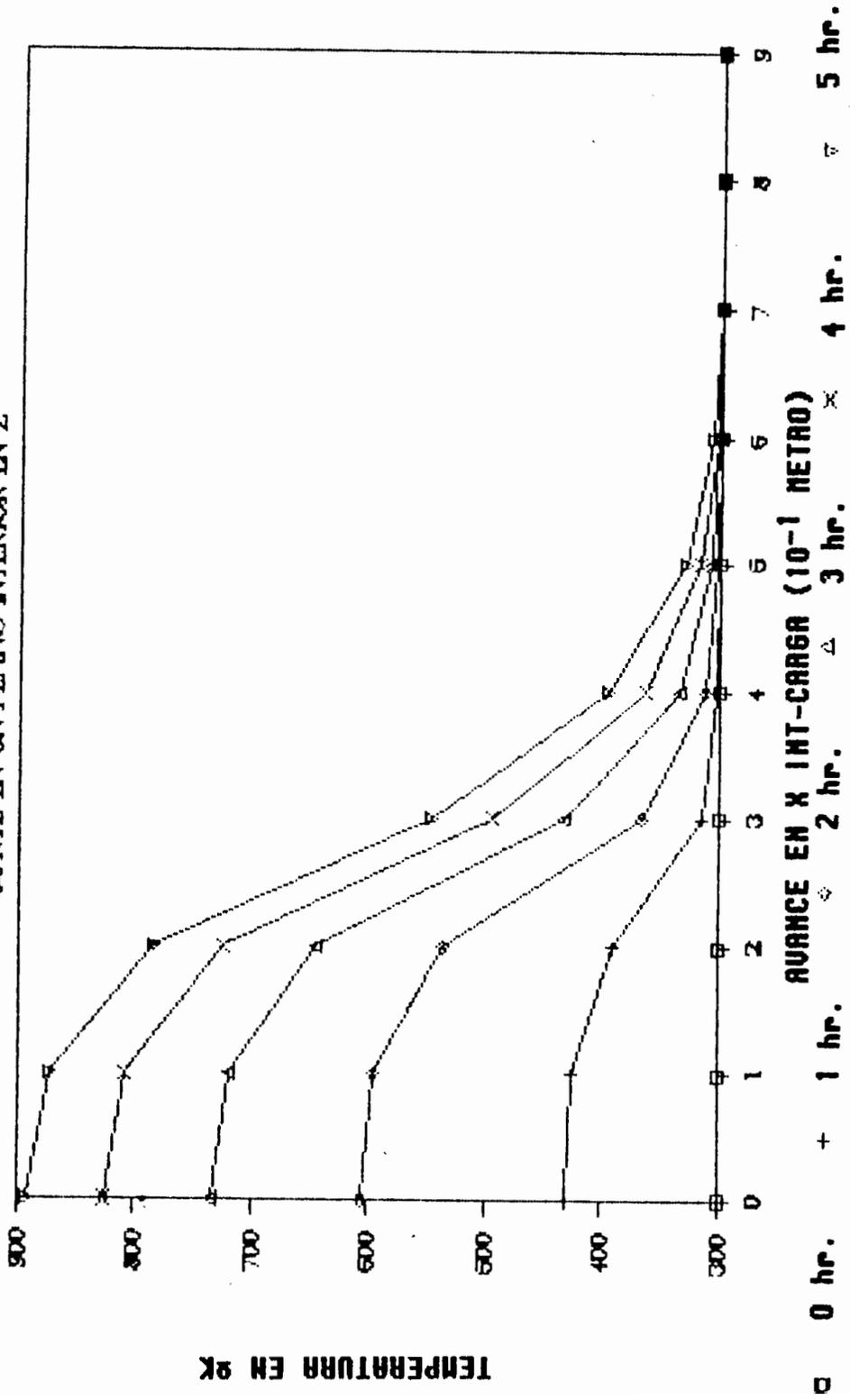
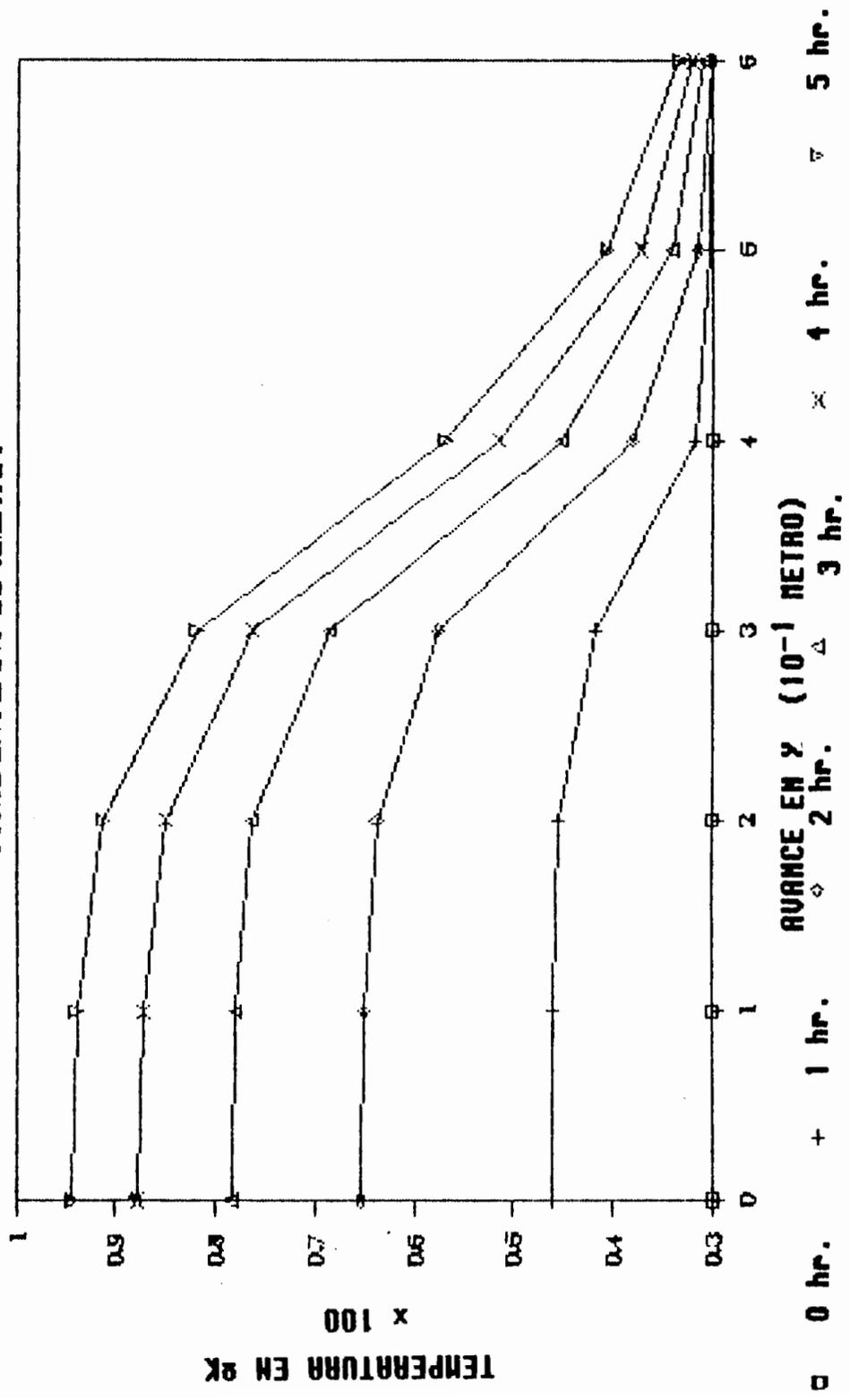
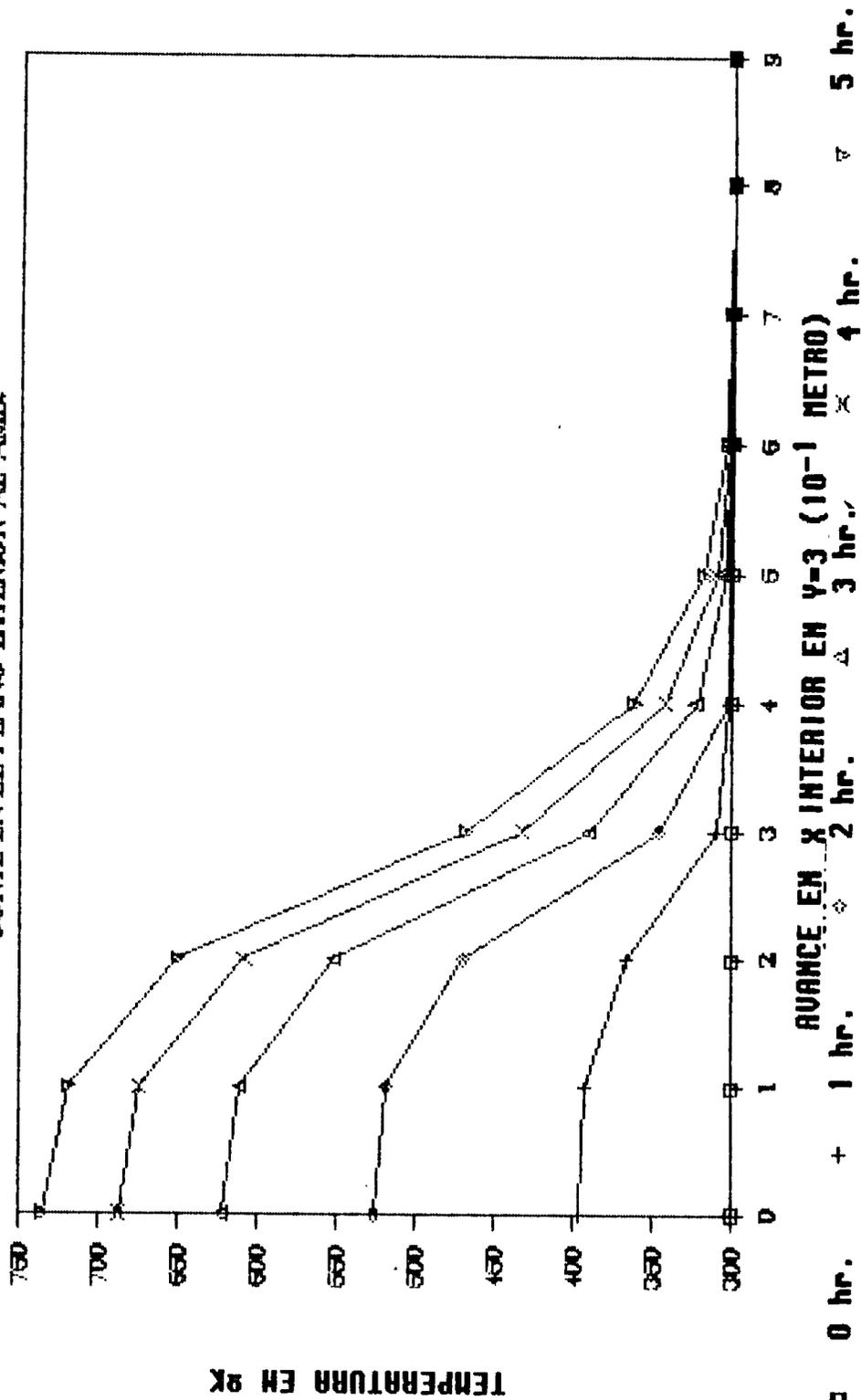


GRAFICO 6.3.7

Tratamiento tridimensional
CORTE EN PLANO DE SIMETRIA

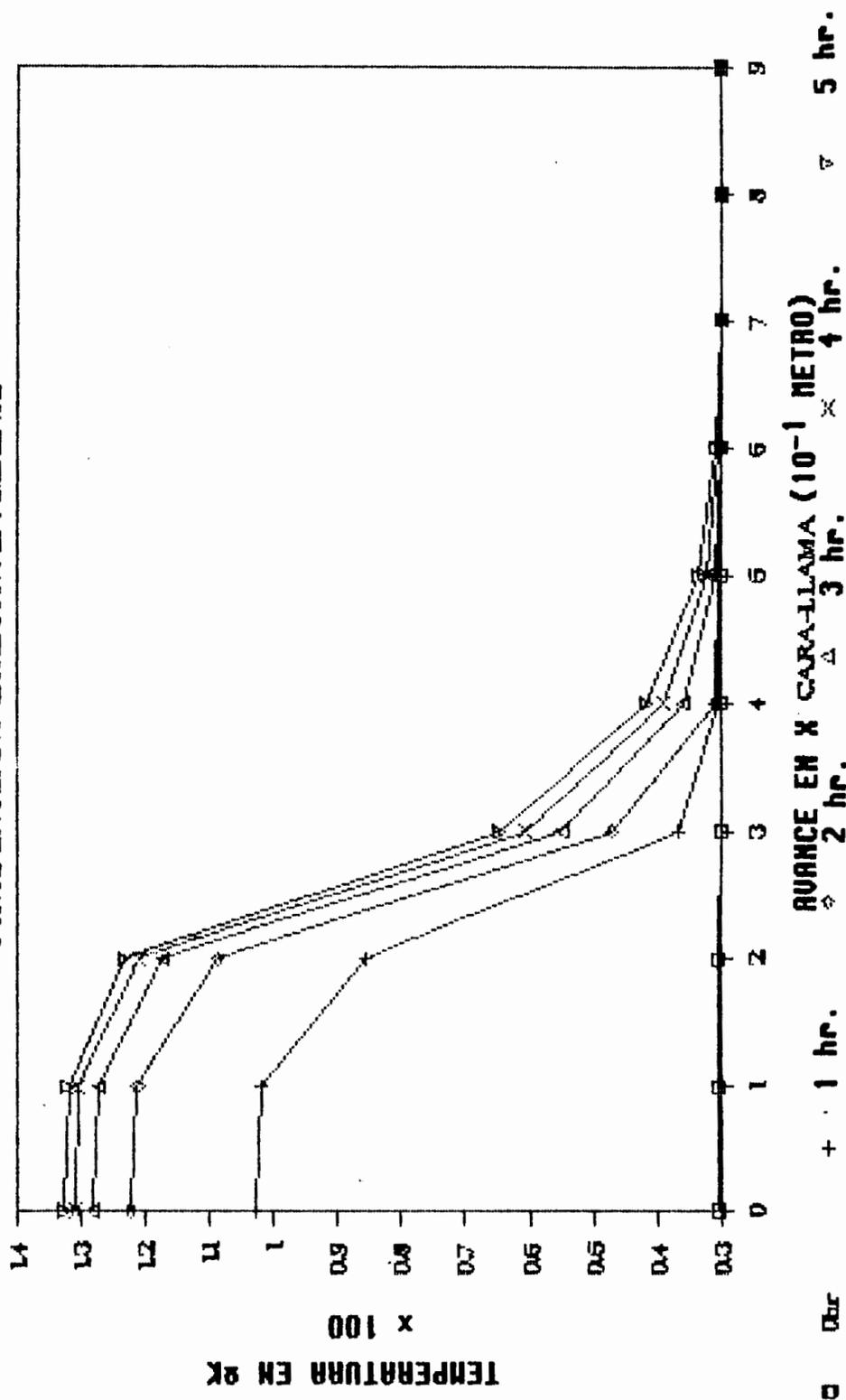


Tratamiento tridimensional
CORTE EN EL PLANO EXTERIOR AL AMBI.



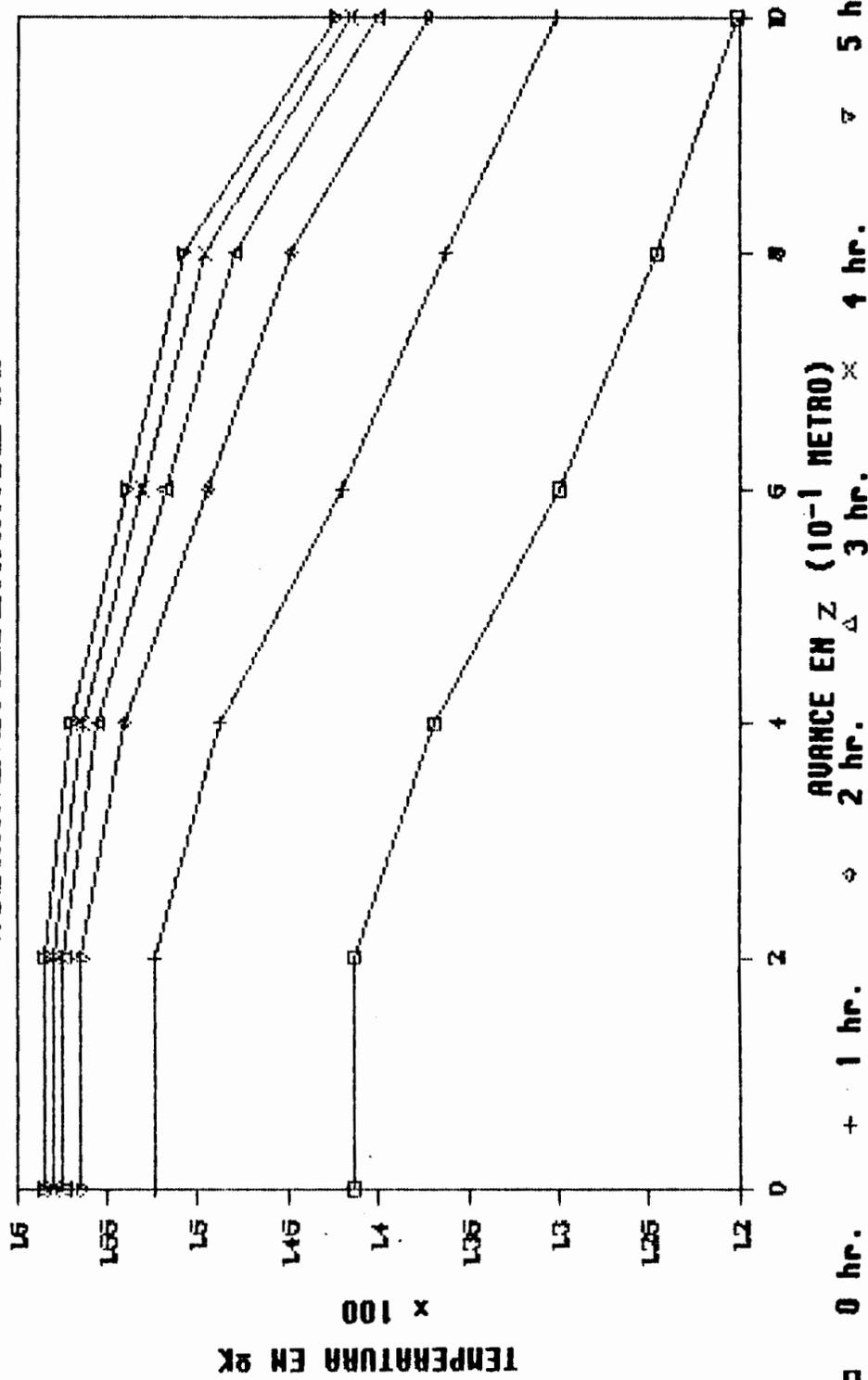
Tratamiento tridimensional

CORTE EN PLANO EXTERIOR AL AMBIENTE



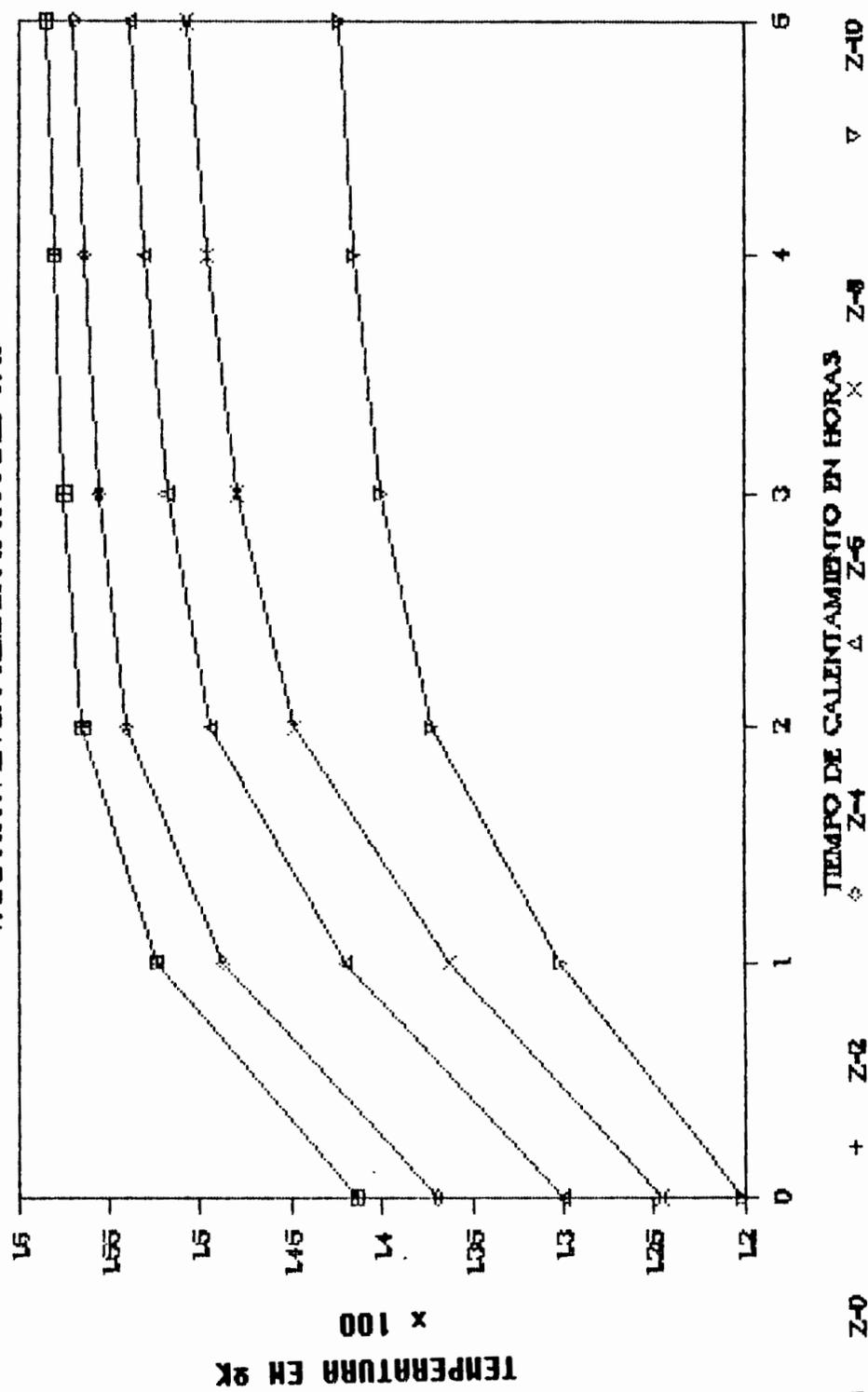
Tratamiento tridimensional

VARIACION EN LA TEMPERATURA DEL GAS



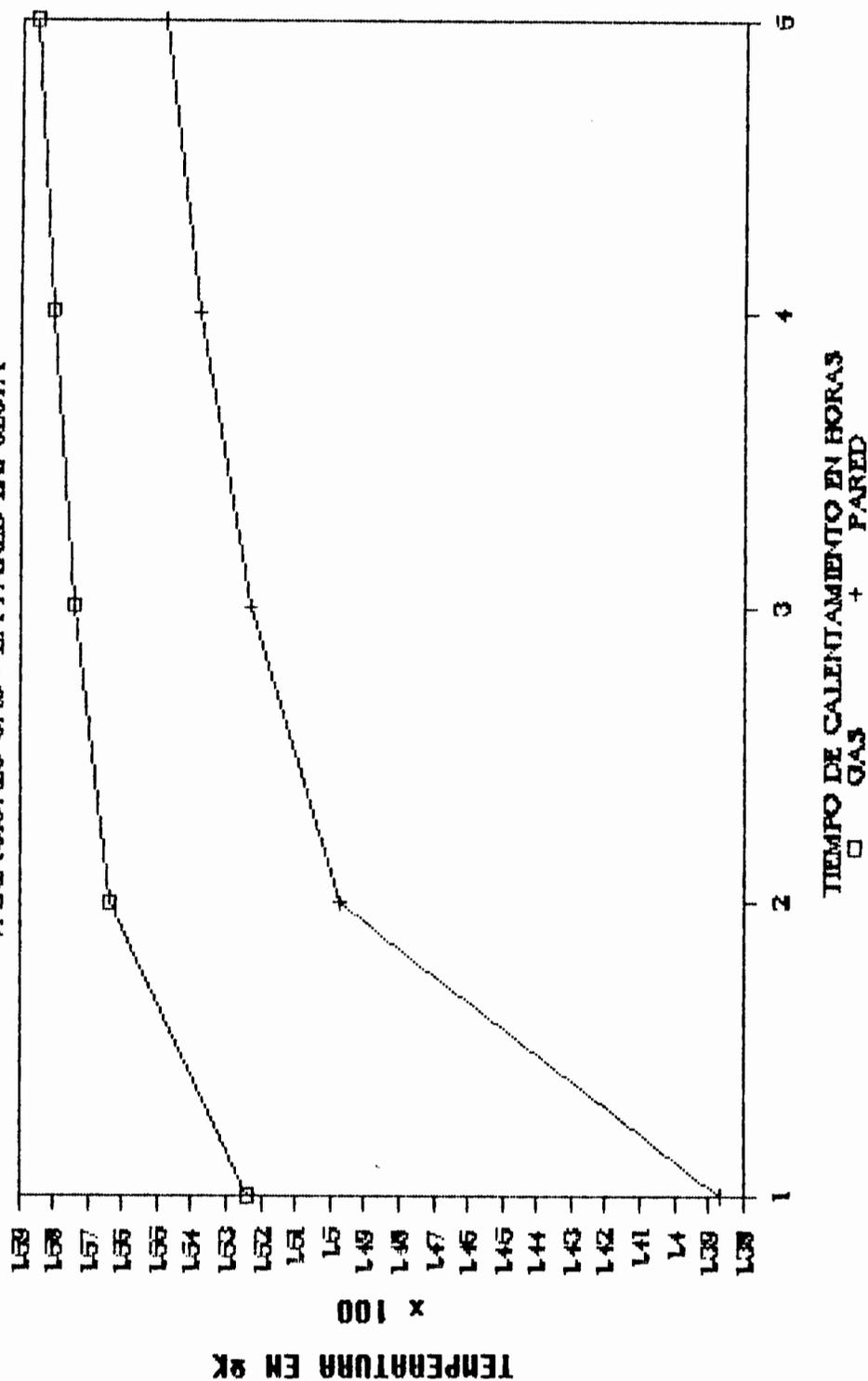
Tratamiento tridimensional

VARIACION EN LA TEMPERATURA DEL GAS



Tratamiento tridimensional

VARIACIONES GAS - LA PARED ESPUESIA



CAPITULO VII

ANALISIS DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en este trabajo representan la influencia de la conducción de calor dentro de la carga de ladrillos, no se incluyen los parámetros de convección desde los gases calientes que pasa a través de los espacios dejados en el armado del horno ni, la radiación de estos gases a las capas de ladrillos fríos, tampoco, se incluye la generación de calor que ocurre en el proceso a medida que sube la llama en las capas, combustionándose el aserrín presente en la composición del ladrillo. Por tanto, los resultados aquí obtenidos no reflejan el comportamiento real del proceso de cochura del horno ladrillero.

Para llegar a modelar la situación real, se tiene que realizar una investigación experimental en el campo para luego establecer patrones de comportamiento que permitan evaluar matemáticamente los procesos no incluidos en este trabajo.

Los programas fueron corridos para diferentes flujos de combustible obteniéndose que; un incremento del flujo de com

bustible, incrementa considerablemente la temperatura del gas así como la temperatura de la pared expuesta a la llama y unos pocos nodos cercanos a esta. Sin embargo, el incremento no tiene mucha penetración, por lo que no resulta económico aumentar el flujo y puede en cierto momento ser perjudicial debido a que los ladrillos más cercanos a la llama alcanzarán temperaturas muy elevadas (en 5 horas llega hasta 1505^oK), y estarán sobrequemados siendo desechados, sin conseguir una disminución en el tiempo de cocción.

En el modelaje bidimensional y tridimensional se observa que la distribución de temperatura conserva la misma forma característica debido a la presencia de la boca que ocasiona una elevación más notoria en las primeras capas de los ladrillos expuestos a la llama.

El gráfico 6.2.7, muestra la distribución completa de la temperatura del horno para un tiempo de 5 horas de calentamiento. Se aprecia la tendencia a desaparecer, en las últimas capas avanzando en el eje y, la forma acampanada provocada por la presencia de la boca.

El gráfico 6.2.4, da la distribución de temperatura de los nodos expuestos a la llama en el eje Y, alrededor de una boca para los distintos tiempos. Se observa que la temperatura aumenta bruscamente en los primeros instantes para luego mantenerse un aumento mucho menor.

En el gráfico 6.2.3, se tiene lo mismo que en el anterior pero, para nodos ubicados en el interior de la carga, la forma es más

regular que en el anterior. Los incrementos son graduales y a una velocidad uniforme.

El comportamiento tridimensional es similar al bidimensional. La diferencia radica en que en el tridimensional se tiene que la temperatura del gas varía a lo largo del eje Z. El gas al pasar por los nodos va cediendo calor a estos por lo que se enfría, esto se aprecia en el gráfico 6.3.10.

En general, la temperatura del gas es variable para cada incremento de tiempo, registrándose un incremento rápido al inicio para luego estabilizarse y tender a una forma asintótica mostrada en el gráfico 6.3.11.

La pared expuesta a la llama presenta una elevación muy rápida de temperatura para los primeros tiempos, acercándose a la temperatura del gas. Para tiempos mayores la tendencia es a tomar la misma forma de la temperatura del gas. Manteniéndose a una distancia más o menos uniforme de la curva del gas.

La temperatura de las capas internas del horno se incrementan lentamente, notándose una distancia considerable de los nodos expuestos a la llama con respecto a los siguientes y subsiguientes. De esto se concluye que el intercambio convectivo y radiativo dentro de la carga juega un papel muy importante en el proceso de cocción de ladrillos.

Otro factor que tiene un peso considerable es la generación interna de calor, ya sea debido a la presencia de aserrín dentro de la mezcla y/o al combustible sólido (aserrín, carbón,

desperdicios combustibles), que se colocan en el armado de la carga para ayudar a alcanzar la temperatura de cocción en un menor período de tiempo.

El proceso de la cochura de ladrillos es lento y se requiere de mucho tiempo para obtener ladrillos bien cocidos. Es por esto, que se busca acelerar el proceso, colocando elementos combustibles, sólidos o líquidos en el tope de los hornos, para darles mayor capacidad de calentamiento.

La conductividad es una propiedad que depende de la temperatura, en el proceso de cochura de los ladrillos el rango de temperatura de trabajo es grande por lo que, tiene influencia notoria en la conductividad de el ladrillo. A medida que la temperatura aumenta, la conductividad se incrementa y por lo tanto, el material es capaz de transmitir mayor cantidad de calor a los niveles de menor temperatura incrementándose el intercambio de calor por conducción.

Los resultados obtenidos se ajustan a las formas teóricamente esperadas para conducción pura en sólidos.

APENDICES

APENDICE A

CARACTERISTICAS TECNICAS

HORNO

Altura	1.5 metros
Ancho	4.7 metros
Profundidad	2.3 metros

ARCILLA

Densidad	2000 kg/m ³
Calor específico	840 J/kg ^o K
Conductividad	1.32 W/m ^o k
Absortividad	0.8

COMBUSTIBLE

Poder calorífico inferior	44.5 MJ/kg
Calor específico del gas	1170 J/kg ^o k
Emissividad	0.85
Relación aire-combustible real	19

CONSTANTES

Stefan Boltzmann	$5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$
Coefficiente convectivo exterior	5 W/m ² oK

APENDICE B

CORRIDA DE LOS PROGRAMAS

En este apendice se muestran los resultados obtenidos al correr los programas en el seguimiento unidimensional, bidimensional y tridimensional del problema.

Se presentan corridas para consumos de combustible de 3, 4 y 5 kg/h tanto en el tratamiento unidimensional como en el bidimensional. Del programa en tres dimensiones se muestran los resultados para consumo de 5 kg/h.

**RESULTADO DEL TRATAMIENTO
UNIDIMENSIONAL**

RESULTADOS DEL CALENTAMIENTO DEL HORNO

PARA UN ESPACIAMIENTO ENTRE NODOS = 0.1 METRO

CUANDO LOS INCREMENTOS DE TIEMPO EN MINUTOS ES= 2 MINUTOS

SIENDO LAS PROPIEDADES DEL MATERIAL

CONDUCTIVIDAD DEL LADRILLO= VARIABLE

DENSIDAD DEL LADRILLO = 2000 KG/M3

CALOR ESPECIFICO = 840 J/KG~K

ABSORTIVIDAD DEL LADRILLO= .8

CUANDO EL COMBUSTIBLE Y EL GAS TIENEN COMO PROPIEDADES

PODER CALORIFICO INFERIOR DEL COMBUSTIBLE = 4.45E+07 J/KG

EMISIVIDAD DEL GAS = .85

RELACION AIRE COMBUSTIBLE EN LA COMBUSTION = 19 - 1

FLUJO MASICO DE COMBUSTIBLE = 1.388889E-03 KG/S

TG SIN INFLUENCIA DE LAS CARGA DE LADRILLOS ES DE 1631.197~K

**DISTRIBUCION DE TEMPERATURA
CON RESPECTO AL TIEMPO DE CALENTAMIENTO**

TG	NODO 1	NODO 2	NODO 3	NODO 4	NODO 5	NODO 6	NODO 7	TIEMP	Tper
757.8	301.8	300.0	300.0	300.0	300.0	300.0	300.0	0.0	873.3
864.3	678.4	349.2	304.2	300.3	300.0	300.0	300.0	60.0	747.4
963.2	863.4	437.5	323.5	303.0	300.3	300.0	300.0	120.0	649.1
1000.4	920.6	481.7	338.1	306.1	300.8	300.1	300.0	150.0	613.7
1031.0	964.8	523.2	354.8	310.5	301.6	300.2	300.0	180.0	584.9
1056.7	1000.3	561.7	373.1	316.1	302.9	300.4	300.1	210.0	560.5
1078.7	1029.9	597.0	392.2	322.8	304.6	300.8	300.1	240.0	539.6
1098.0	1055.1	629.4	411.8	330.5	306.9	301.3	300.2	270.0	521.4

FLUJO MASICO DE COMBUSTIBLE = 1.111111E-03 KG/S

TG	NODO 1	NODO 2	NODO 3	NODO 4	NODO 5	NODO 6	NODO 7	TIMP	Tper
716.6	301.5	300.0	300.0	300.0	300.0	300.0	300.0	0.0	914.4
762.6	488.2	312.3	300.5	300.0	300.0	300.0	300.0	30.0	853.1
812.1	620.8	341.4	303.6	300.2	300.0	300.0	300.0	60.0	801.4
858.0	716.3	378.2	310.1	301.0	300.1	300.0	300.0	90.0	755.2
897.8	786.9	417.3	319.9	302.6	300.3	300.0	300.0	120.0	715.9
931.4	840.9	456.0	332.4	305.2	300.7	300.1	300.0	150.0	683.4
960.0	883.7	492.8	346.9	308.9	301.4	300.2	300.0	180.0	656.3
984.5	918.7	527.3	362.9	313.7	302.5	300.4	300.0	210.0	632.8
1005.9	948.3	559.4	379.7	319.6	304.0	300.7	300.1	240.0	612.4
1024.8	973.8	589.0	397.0	326.3	305.9	301.1	300.2	270	594.0

FLUJO MASICO DE COMBUSTIBLE = 8.333334E-04 KG/S

TG	NODO 1	NODO 2	NODO 3	NODO 4	NODO 5	NODO 6	NODO 7	TIMP	Tper
665.2	301.2	300.0	300.0	300.0	300.0	300.0	300.0	0.0	965.8
707.3	449.7	309.7	300.4	300.0	300.0	300.0	300.0	30.0	908.8
749.1	557.3	333.0	302.8	300.2	300.0	300.0	300.0	60.0	866.1
786.9	637.0	362.7	308.1	300.8	300.1	300.0	300.0	90.0	828.2
819.9	697.9	394.6	316.0	302.1	300.2	300.0	300.0	120.0	795.8
848.5	746.0	426.6	326.1	304.2	300.5	300.1	300.0	150.0	767.9
873.5	785.1	457.5	338.0	307.2	301.1	300.1	300.0	180.0	743.9
895.4	817.9	486.9	351.1	311.1	302.0	300.3	300.0	210.0	722.9
915.0	846.0	514.4	365.1	315.9	303.2	300.5	300.1	240.0	703.9
932.5	870.6	540.2	379.6	321.4	304.8	300.9	300.2	270.0	686.7

RESULTADOS DEL CALENTAMIENTO DEL HORNO

PARA UN ESPACIAMIENTO ENTRE NODOS = 0.1

CUANDO LOS INCREMENTOS DE TIEMPO EN MINUTOS ES= 2.5

SIENDO LAS PROPIEDADES DEL MATERIAL

CONDUCTIVIDAD DEL LADRILLO= 1.32 W/M²K

DENSIDAD DEL LADRILLO = 2000 KG/M³

CALOR ESPECIFICO = 840 J/KG²K

ABSORTIVIDAD DEL LADRILLO= .8

CUANDO EL COMBUSTIBLE Y EL GAS TIENEN COMO PROPIEDADES

PODER CALORIFICO INFERIOR DEL COMBUSTIBLE = 4.45E+07 J/KG

EMISIVIDAD DEL GAS = .85

RELACION AIRE COMBUSTIBLE EN LA COMBUSTION = 19 - 1

FLUJO MASICO DE COMBUSTIBLE = 1.388889E-03 KG/S

DISTRIBUCION DE TEMPERATURA**PARA LOS DISTINTOS AVANCES DE TIEMPO**

TG	NODO 1	NODO 2	NODO 3	NODO 4	NODO 5	NODO 6	NODO 7	TIMP	TQrad.
757.8	302.2	300.0	300.0	300.0	300.0	300.0	300.0	0.0	873.3
864.4	681.0	349.0	304.2	300.3	300.0	300.0	300.0	60.0	742.0
968.4	873.2	437.8	323.3	303.0	300.3	300.0	300.0	120.0	637.2
1008.6	934.1	482.4	337.9	306.1	300.8	300.1	300.0	150.0	598.9
1042.1	981.4	524.6	354.7	310.4	301.6	300.2	300.0	180.0	567.3
1070.3	1019.6	563.8	373.1	316.0	302.9	300.4	300.1	210.0	540.9
1094.4	1051.2	599.9	392.3	322.7	304.6	300.8	300.1	240.0	518.5
1115.4	1078.1	633.0	411.9	330.4	306.9	301.3	300.2	270.0	499.1
1133.9	1101.3	663.5	431.7	339.0	309.7	302.0	300.4	300.0	481.8

FLUJO MASICO DE COMBUSTIBLE = 1.111111E-03 KG/S

TG	NODO 1	NODO 2	NODO 3	NODO 4	NODO 5	NODO 6	NODO 7	TIMP	TGrad.
716.6	301.8	300.0	300.0	300.0	300.0	300.0	300.0	0.0	914.4
761.9	488.7	312.1	300.5	300.0	300.0	300.0	300.0	30.0	850.0
812.0	622.7	341.3	303.5	300.2	300.0	300.0	300.0	60.0	796.6
859.5	720.8	378.2	310.0	301.0	300.1	300.0	300.0	90.0	748.0
901.5	794.5	417.5	319.8	302.5	300.3	300.0	300.0	120.0	706.2
937.7	851.6	456.6	332.3	305.2	300.7	300.1	300.0	150.0	671.3
968.6	897.3	494.0	346.9	308.9	301.4	300.2	300.0	180.0	641.6
995.4	934.8	529.1	362.9	313.7	302.4	300.4	300.0	210.0	616.2
1018.8	966.4	561.9	379.8	319.5	303.9	300.7	300.1	240.0	594.0
1039.4	993.7	592.3	397.2	326.2	305.9	301.1	300.2	270.0	574.5
1057.9	1017.5	620.5	414.8	333.7	308.3	301.7	300.3	300.0	556.9

FLUJO MASICO DE COMBUSTIBLE = 8.333334E-04 KG/S

TG	NODO 1	NODO 2	NODO 3	NODO 4	NODO 5	NODO 6	NODO 7	TIMP	TGrad.
665.2	301.5	300.0	300.0	300.0	300.0	300.0	300.0	0.0	965.8
706.7	450.0	309.6	300.4	300.0	300.0	300.0	300.0	30.0	905.6
748.9	558.5	332.9	302.8	300.2	300.0	300.0	300.0	60.0	861.9
787.7	640.0	362.6	308.0	300.8	300.1	300.0	300.0	90.0	822.6
822.3	703.2	394.7	315.9	302.0	300.2	300.0	300.0	120.0	788.4
852.7	753.6	427.0	326.0	304.1	300.5	300.1	300.0	150.0	758.7
879.4	795.0	458.4	337.9	307.1	301.1	300.1	300.0	180.0	732.9
903.1	829.9	488.2	351.1	311.0	302.0	300.3	300.0	210.0	709.9
924.3	859.9	516.4	365.2	315.8	303.2	300.0	300.0	240.0	689.6
943.5	886.2	542.8	379.8	321.3	304.8	300.9	300.1	270.0	671.4
960.8	909.5	567.5	394.7	327.6	306.7	301.4	300.3	300.0	654.4

**RESULTADO DEL TRATAMIENTO
BIDIMENSIONAL**

**CALOR QUE ENTRA A LOS NODOS EXPUESTOS A
LA LLAMA POR EFECTO COMBINADO DE
CONVECCION Y RADIACION**

NODO 1	NODO 2	NODO 3	NODO 4	NODO 5	NODO 6
597.8	1268.2	2063.0	1187.2	1267.4	590.1

**DISTRIBUCION DE TEMPERATURA
A 3 HORAS DE CALENTAMIENTO**

NODO 0	NODO 1	NODO 2	NODO 3	NODO 4	NODO 5	NODO 6	NODO 7	NODO 8	NODO 9
1405.5	1405.5	1326.9	672.5	396.9	319.3	303.1	300.4	300.0	300.0
1405.5	1405.5	1326.2	669.6	395.7	319.0	303.0	300.4	300.0	300.0
1405.5	1405.5	1318.6	652.8	389.1	317.4	302.8	300.4	300.0	300.0
1325.3	1318.4	1224.7	585.3	368.0	312.9	302.0	300.3	300.0	300.0
665.5	652.1	585.2	406.5	327.3	305.3	300.8	300.1	300.0	300.0
393.8	388.7	368.0	327.3	307.3	301.5	300.2	300.0	300.0	300.0
318.5	317.3	312.9	305.3	301.5	300.3	300.0	300.0	300.0	300.0
302.9	302.7	302.0	300.8	300.2	300.0	300.0	300.0	300.0	300.0

**CALOR QUE ENTRA A LOS NODOS EXPUESTOS A
LA LLAMA POR EFECTO COMBINADO DE
CONVECCION Y RADIACION**

NODO 1	NODO 2	NODO 3	NODO 4	NODO 5	NODO 6
497.3	1055.5	1810.0	986.0	1054.4	489.8

**DISTRIBUCION DE TEMPERATURA
A 4 HORAS DE CALENTAMIENTO**

NODO 0	NODO 1	NODO 2	NODO 3	NODO 4	NODO 5	NODO 6	NODO 7	NODO 8	NODO 9
1430.1	1430.1	1368.6	765.1	452.6	339.4	308.3	301.5	300.2	300.0
1430.1	1430.1	1367.8	761.0	450.2	338.6	308.1	301.4	300.2	300.0
1430.1	1430.1	1361.0	739.8	439.5	335.2	307.3	301.3	300.2	300.0
1366.8	1360.8	1279.6	662.8	409.0	326.7	305.4	300.9	300.1	300.0
754.8	738.5	662.6	461.2	351.8	313.0	302.7	300.5	300.1	300.0
446.6	438.7	408.9	351.8	317.4	304.5	300.9	300.2	300.0	300.0
337.3	334.9	326.6	313.0	304.5	301.2	300.3	300.0	300.0	300.0
307.8	307.2	305.4	302.7	300.9	300.3	300.1	300.0	300.0	300.0

**CALOR QUE ENTRA A LOS NODOS EXPUESTOS A
LA LLAMA POR EFECTO COMBINADO DE
CONVECCION Y RADIACION**

NODO 1	NODO 2	NODO 3	NODO 4	NODO 5	NODO 6
441.4	940.1	1662.7	872.5	938.3	432.6

**DISTRIBUCION DE TEMPERATURA
A 5 HORAS DE CALENTAMIENTO**

NODO 0	NODO 1	NODO 2	NODO 3	NODO 4	NODO 5	NODO 6	NODO 7	NODO 8	NODO 9
1446.4	1446.4	1395.6	836.0	506.0	363.9	316.4	303.6	300.7	300.1
1446.4	1446.4	1394.8	830.8	502.5	362.5	316.0	303.5	300.7	300.1
1446.4	1446.4	1388.4	806.2	487.8	356.9	314.4	303.1	300.6	300.1
1393.6	1388.1	1314.3	723.0	449.1	343.9	310.9	302.3	300.4	300.1
822.5	804.2	722.6	510.3	379.1	323.9	306.0	301.3	300.2	300.0
496.6	486.3	448.7	379.0	331.0	309.6	302.5	300.5	300.1	300.0
360.0	356.2	343.7	323.9	309.6	303.0	300.8	300.2	300.0	300.0
315.2	314.2	310.8	306.0	302.5	300.8	300.2	300.0	300.0	300.0

**CALOR QUE ENTRA A LOS NODOS EXPUESTOS A
LA LLAMA POR EFECTO COMBINADO DE
CONVECCION Y RADIACION**

NODO 1	NODO 2	NODO 3	NODO 4	NODO 5	NODO 6
403.6	863.0	1561.4	794.6	860.5	393.2

**RESULTADO DEL TRATAMIENTO
TRIDIMENSIONAL**

PLANO Z=10

NODO 0	NODO 1	NODO 2	NODO 3	NODO 4	NODO 5	NODO 6	NODO 7	NODO 8	NODO 9
1302.2	1302.2	1031.9	396.0	308.3	300.5	300.0	300.0	300.0	300.0
1302.2	1302.2	1031.0	395.7	308.3	300.5	300.0	300.0	300.0	300.0
1302.2	1302.2	1017.2	392.2	307.9	300.5	300.0	300.0	300.0	300.0
1030.0	1017.1	854.7	366.5	305.5	300.3	300.0	300.0	300.0	300.0
395.4	392.2	366.5	310.1	300.9	300.1	300.0	300.0	300.0	300.0
308.2	307.9	305.5	300.9	300.1	300.0	300.0	300.0	300.0	300.0
300.5	300.5	300.3	300.1	300.0	300.0	300.0	300.0	300.0	300.0
300.0	300.0	300.0	300.0	300.0	300.0	300.0	300.0	300.0	300.0
300.0	300.0	300.0	300.0	300.0	300.0	300.0	300.0	300.0	300.0

CALOR QUE ENTRA A LOS NODOS POR

RADIACION Y CONVECCION

NODO 1	NODO 2	NODO 3	NODO 4	NODO 5	NODO 6
48.4	102.3	173.5	96.4	102.3	48.0
96.9	204.9	347.3	193.0	204.9	96.2
99.1	208.8	337.4	197.4	208.8	98.4
99.2	207.6	310.6	197.7	207.6	98.5
96.4	200.6	283.5	192.2	200.6	95.8
48.9	100.6	130.6	97.5	100.6	48.6

EL TIEMPO DE CALENTAMIENTO ES DE 1 HORA

PLANO Z=10

NODO 0	NODO 1	NODO 2	NODO 3	NODO 4	NODO 5	NODO 6	NODO 7	NODO 8	NODO 9
1400.8	1400.8	1281.5	626.7	382.0	316.0	302.5	300.3	300.0	300.0
1400.8	1400.8	1280.9	624.4	381.0	315.8	302.5	300.3	300.0	300.0
1400.8	1400.8	1273.1	610.3	375.6	314.5	302.3	300.3	300.0	300.0
1280.0	1273.0	1171.6	551.1	358.0	310.8	301.6	300.2	300.0	300.0
621.1	609.8	551.1	391.3	323.0	304.4	300.7	300.1	300.0	300.0
379.6	375.4	357.9	323.0	306.1	301.2	300.2	300.0	300.0	300.0
315.4	314.4	310.8	304.4	301.2	300.2	300.0	300.0	300.0	300.0
302.4	302.2	301.6	300.7	300.2	300.0	300.0	300.0	300.0	300.0
300.3	300.3	300.2	300.1	300.0	300.0	300.0	300.0	300.0	300.0

CALOR QUE ENTRA A LOS NODOS POR

RADIACION Y CONVECCION

NODO 1	NODO 2	NODO 3	NODO 4	NODO 5	NODO 6
26.0	54.7	100.3	51.6	54.7	25.7
52.0	109.6	200.9	103.3	109.5	51.4
52.0	109.7	199.5	103.3	109.6	51.4
51.9	109.6	196.3	103.1	109.5	51.3
52.1	110.0	193.5	103.4	109.9	51.4
33.2	69.3	106.1	66.1	69.2	32.9

TIEMPO DE CALENTAMIENTO 3 HORAS

PLANO Z=0

NODO 0	NODO 1	NODO 2	NODO 3	NODO 4	NODO 5	NODO 6	NODO 7	NODO 8	NODO 9
1580.3	1580.3	1539.5	877.3	500.7	354.3	311.8	302.2	300.3	300.1
1580.3	1580.3	1538.9	872.8	498.0	353.3	311.6	302.1	300.3	300.1
1580.3	1580.3	1534.2	849.4	485.2	349.0	310.5	301.9	300.3	300.1
1538.2	1534.1	1466.0	762.2	447.5	337.8	308.0	301.4	300.2	300.1
866.1	848.0	762.0	516.4	373.0	319.1	304.0	300.7	300.1	300.0
493.7	484.2	447.3	372.9	325.5	306.8	301.5	300.3	300.0	300.0
351.7	348.6	337.8	319.1	306.8	301.8	300.4	300.1	300.0	300.0
311.2	310.4	308.0	304.0	301.5	300.4	300.1	300.0	300.0	300.0
302.0	301.9	301.4	300.7	300.3	300.1	300.0	300.0	300.0	300.0

PLANO Z=2

NODO 0	NODO 1	NODO 2	NODO 3	NODO 4	NODO 5	NODO 6	NODO 7	NODO 8	NODO 9
1580.3	1580.3	1539.3	876.0	499.9	354.0	311.8	302.1	300.3	300.1
1580.3	1580.3	1538.8	871.6	497.2	353.0	311.5	302.1	300.3	300.1
1580.3	1580.3	1534.0	848.2	484.4	348.7	310.5	301.9	300.3	300.1
1538.0	1533.9	1465.7	761.2	446.8	337.6	307.9	301.4	300.2	300.1
864.9	846.9	760.9	515.5	372.6	319.0	304.0	300.7	300.1	300.0
492.9	483.5	446.7	372.5	325.3	306.7	301.4	300.3	300.0	300.0
351.4	348.4	337.5	319.0	306.7	301.8	300.4	300.1	300.0	300.0
311.1	310.4	307.9	304.0	301.4	300.4	300.1	300.0	300.0	300.0
302.0	301.9	301.4	300.7	300.3	300.1	300.0	300.0	300.0	300.0

PLANO Z=4

NODO 0	NODO 1	NODO 2	NODO 3	NODO 4	NODO 5	NODO 6	NODO 7	NODO 8	NODO 9
1563.4	1563.4	1520.1	861.9	493.2	351.8	311.2	302.0	300.3	300.1
1563.4	1563.4	1519.6	857.5	490.6	350.8	311.0	302.0	300.3	300.1
1563.4	1563.4	1514.7	834.4	478.1	346.7	310.0	301.8	300.3	300.1
1518.8	1514.5	1444.8	748.6	441.5	335.9	307.5	301.3	300.2	300.0
850.8	833.1	748.4	508.0	369.5	318.0	303.8	300.7	300.1	300.0
486.3	477.2	441.3	369.4	324.0	306.4	301.4	300.2	300.0	300.0
349.3	346.3	335.9	318.0	306.4	301.7	300.4	300.1	300.0	300.0
310.6	309.9	307.5	303.8	301.4	300.4	300.1	300.0	300.0	300.0
301.9	301.8	301.3	300.7	300.2	300.1	300.0	300.0	300.0	300.0

PLANO Z=6

NODO 0	NODO 1	NODO 2	NODO 3	NODO 4	NODO 5	NODO 6	NODO 7	NODO 8	NODO 9
1530.2	1530.2	1482.4	835.6	481.4	347.9	310.3	301.8	300.3	300.1
1530.2	1530.2	1481.8	831.4	478.8	347.0	310.0	301.8	300.3	300.1
1530.2	1530.2	1476.4	808.8	466.9	343.1	309.1	301.6	300.2	300.1
1480.9	1476.3	1403.8	725.5	432.0	333.1	306.8	301.2	300.2	300.0
824.8	807.5	725.2	494.6	364.1	316.4	303.4	300.6	300.1	300.0
474.8	466.0	431.9	364.1	321.9	305.7	301.2	300.2	300.0	300.0
345.6	342.8	333.0	316.4	305.7	301.5	300.3	300.1	300.0	300.0
309.7	309.0	306.8	303.4	301.2	300.3	300.1	300.0	300.0	300.0
301.7	301.6	301.2	300.6	300.2	300.1	300.0	300.0	300.0	300.0

PLANO Z=8

NODO 0	NODO 1	NODO 2	NODO 3	NODO 4	NODO 5	NODO 6	NODO 7	NODO 8	NODO 9
1496.4	1496.4	1442.9	805.7	468.0	343.7	309.3	301.6	300.3	300.1
1496.4	1496.4	1442.2	801.6	465.5	342.9	309.0	301.6	300.2	300.1
1496.4	1496.4	1436.4	779.8	454.3	339.3	308.2	301.4	300.2	300.1
1441.3	1436.3	1360.2	699.3	421.5	330.0	306.1	301.1	300.2	300.0
795.3	778.5	699.1	479.7	358.3	314.8	303.0	300.5	300.1	300.0
461.7	453.4	421.3	358.2	319.7	305.1	301.1	300.2	300.0	300.0
341.5	339.0	329.9	314.7	305.1	301.3	300.3	300.0	300.0	300.0
308.7	308.1	306.1	303.0	301.1	300.3	300.1	300.0	300.0	300.0
301.5	301.4	301.1	300.5	300.2	300.0	300.0	300.0	300.0	300.0

PLANO Z=10

NODO 0	NODO 1	NODO 2	NODO 3	NODO 4	NODO 5	NODO 6	NODO 7	NODO 8	NODO 9
1414.9	1414.9	1309.6	694.9	424.1	331.4	306.5	301.1	300.2	300.0
1414.9	1414.9	1308.9	691.7	422.3	330.8	306.4	301.1	300.2	300.0
1414.9	1414.9	1301.8	674.5	413.9	328.2	305.8	301.0	300.1	300.0
1308.0	1301.7	1209.5	608.5	389.2	321.4	304.3	300.7	300.1	300.0
686.9	673.5	608.4	432.8	341.8	310.4	302.1	300.4	300.1	300.0
419.5	413.3	389.1	341.8	313.9	303.6	300.7	300.1	300.0	300.0
329.8	327.9	321.4	310.4	303.6	300.9	300.2	300.0	300.0	300.0
306.1	305.7	304.3	302.1	300.7	300.2	300.0	300.0	300.0	300.0
301.1	301.0	300.7	300.4	300.1	300.0	300.0	300.0	300.0	300.0

CALOR QUE ENTRA A LOS NODOS POR

RADIACION Y CONVECCION

NODO 1	NODO 2	NODO 3	NODO 4	NODO 5	NODO 6
23.1	49.0	91.9	45.8	48.9	22.7
46.4	98.3	184.0	91.7	98.1	45.5
46.3	98.1	182.5	91.6	97.9	45.4
46.0	97.7	179.2	91.1	97.5	45.2
46.2	98.0	177.0	91.4	97.9	45.3
31.2	65.1	101.0	62.0	65.0	30.8

TIEMPO DE CALENTAMIENTO 4 HORAS

PLANO Z=0

NODO 0	NODO 1	NODO 2	NODO 3	NODO 4	NODO 5	NODO 6	NODO 7	NODO 8	NODO 9
1584.5	1584.5	1550.3	945.6	560.9	384.5	322.5	305.1	301.0	300.3
1584.5	1584.5	1549.7	939.9	556.9	382.8	322.0	304.9	301.0	300.3
1584.5	1584.5	1544.9	912.7	539.5	375.8	319.9	304.4	300.9	300.3
1548.8	1544.7	1481.5	819.6	492.9	359.4	315.3	303.4	300.6	300.2
930.8	910.5	819.2	569.6	405.9	333.3	308.6	301.9	300.4	300.1
550.0	537.7	492.5	405.8	343.1	313.8	303.6	300.8	300.2	300.0
379.7	375.0	359.2	333.2	313.8	304.5	301.2	300.3	300.1	300.0
321.0	319.6	315.2	308.6	303.6	301.2	300.3	300.1	300.0	300.0
304.7	304.3	303.3	301.9	300.8	300.3	300.1	300.0	300.0	300.0

PLANO Z=2

NODO 0	NODO 1	NODO 2	NODO 3	NODO 4	NODO 5	NODO 6	NODO 7	NODO 8	NODO 9
1584.5	1584.5	1550.2	944.2	559.8	384.0	322.4	305.0	301.0	300.3
1584.5	1584.5	1549.6	938.6	555.8	382.3	321.8	304.9	301.0	300.3
1584.5	1584.5	1544.8	911.3	538.5	375.4	319.7	304.4	300.9	300.2
1548.6	1544.6	1481.2	818.4	492.1	359.0	315.2	303.3	300.6	300.2
929.4	909.2	818.0	568.5	405.3	333.0	308.6	301.9	300.4	300.1
549.0	536.7	491.7	405.2	342.8	313.7	303.6	300.8	300.2	300.0
379.3	374.6	358.8	333.0	313.7	304.4	301.2	300.3	300.0	300.0
320.9	319.5	315.1	308.5	303.6	301.2	300.3	300.1	300.0	300.0
304.6	304.3	303.3	301.9	300.8	300.3	300.1	300.0	300.0	300.0

PLANO Z=4

NODO 0	NODO 1	NODO 2	NODO 3	NODO 4	NODO 5	NODO 6	NODO 7	NODO 8	NODO 9
1569.0	1569.0	1532.8	930.8	552.6	381.1	321.5	304.8	300.9	300.3
1569.0	1569.0	1532.2	925.2	548.6	379.5	320.9	304.7	300.9	300.3
1569.0	1569.0	1527.2	898.4	531.7	372.7	318.9	304.2	300.8	300.2
1531.2	1527.0	1462.5	806.6	486.3	356.8	314.5	303.2	300.6	300.2
916.2	896.2	806.2	560.9	401.6	331.7	308.2	301.8	300.3	300.1
541.9	530.0	485.9	401.5	341.1	313.1	303.4	300.7	300.1	300.0
376.5	371.9	356.7	331.6	313.1	304.2	301.1	300.2	300.0	300.0
320.0	318.7	314.5	308.1	303.4	301.1	300.3	300.1	300.0	300.0
304.4	304.1	303.1	301.8	300.7	300.2	300.1	300.0	300.0	300.0

PLANO Z=6

NODO 0	NODO 1	NODO 2	NODO 3	NODO 4	NODO 5	NODO 6	NODO 7	NODO 8	NODO 9
1538.6	1538.6	1498.8	905.9	539.6	376.1	319.9	304.4	300.9	300.2
1538.6	1538.6	1498.1	900.5	535.8	374.5	319.4	304.3	300.8	300.2
1538.6	1538.6	1492.9	874.2	519.5	368.1	317.5	303.8	300.7	300.2
1497.1	1492.6	1425.8	784.7	476.0	353.1	313.4	302.9	300.6	300.2
891.7	872.2	784.3	547.1	395.2	329.3	307.5	301.6	300.3	300.1
529.4	517.9	475.6	395.1	338.1	312.0	303.1	300.7	300.1	300.0
371.7	367.3	352.9	329.3	312.0	303.8	301.0	300.2	300.0	300.0
318.5	317.3	313.4	307.5	303.1	301.0	300.3	300.1	300.0	300.0
304.1	303.8	302.9	301.6	300.7	300.2	300.1	300.0	300.0	300.0

PLANO Z=8

NODO 0	NODO 1	NODO 2	NODO 3	NODO 4	NODO 5	NODO 6	NODO 7	NODO 8	NODO 9
1507.2	1507.2	1462.4	874.3	522.7	369.6	318.0	303.9	300.8	300.2
1507.2	1507.2	1461.7	869.1	519.1	368.1	317.6	303.8	300.7	300.2
1507.2	1507.2	1456.1	843.8	503.8	362.2	315.8	303.4	300.7	300.2
1460.6	1455.8	1385.9	757.3	462.8	348.3	312.1	302.6	300.5	300.1
860.6	841.8	756.9	529.5	387.0	326.5	306.7	301.4	300.3	300.1
513.1	502.2	462.4	387.0	334.4	310.7	302.7	300.6	300.1	300.0
365.5	361.5	348.1	326.4	310.7	303.4	300.9	300.2	300.0	300.0
316.7	315.6	312.0	306.7	302.7	300.9	300.2	300.0	300.0	300.0
303.6	303.4	302.6	301.4	300.6	300.2	300.0	300.0	300.0	300.0

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. Adamn, J. Alan and Rogers, David F., Computer Aided Heat Analysis, International Student Editions, Tokyo-Japan, 1937.
2. Holman, J. P., Heat Transfer, McGraw-Hill Book Company, United States of America, 1981.
3. Incropera, Frank P., Dewitt, David P., Fundamentals of Heat Transfer, Editorial John Wiley & Sons, New York, 1981
4. Salvi, Giuliano, La Combustión, Editorial Dossat, S.A., Madrid, 1975.
5. Brickmaking in developing countries, BRE, England, 1979.
6. Small-Scale brickmaking, ILO, England, 1979.