

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
DIVISION DE ESTUDIOS DE POSTGRADO



MODELO TERMICO DE LA FUSION DE MgO EN UN
HORNO DE ARCO ELECTRICO

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS DE LA INGENIERIA MECANICA
CON ESPECIALIDAD EN MATERIALES

PRESENTA

CARLOS EVARISTO ESPARZA GARCÉS

SAN NICOLAS DE LOS GARZA, N. L., FEBRERO DE 1997



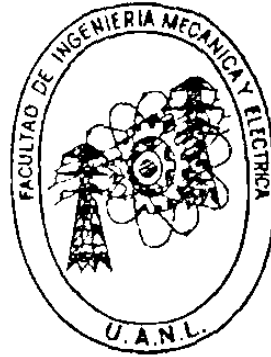
TM
Z5853
.M2
FINE
1997
E83





1020119011

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
DIVISION DE ESTUDIOS DE POSTGRADO



**MODELO TERMICO DE LA FUSION DE MgO EN UN
HORNO DE ARCO ELECTRICO**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS DE LA INGENIERIA MECANICA CON
ESPECIALIDAD EN MATERIALES**

PRESENTA

CARLOS EVARISTO ESPARZA GARCES

SAN NICOLAS DE LOS GARZA, N.L.

FEBRERO DE 1997

TM
25853
.M2
FINE
1997
E83

19-50260

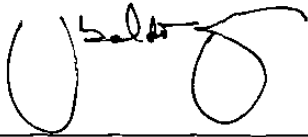


FONDO TESIS

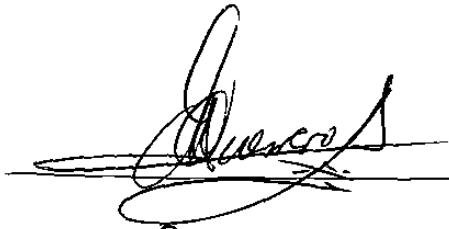
UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
DIVISION DE ESTUDIOS DE POSTGRADO

Los miembros del comité de tesis recomendamos que la tesis "Modelo Térmico de la Fusión de MgO en un Horno de Arco Eléctrico" realizada por el Ing. Carlos Evaristo Esparza Garcés sea aceptada como opción al grado de Maestro en Ciencias de la Ingeniería Mecánica con especialidad en Materiales.


El Comité de Tesis



Asesor
Dr. Ubaldo Ortiz Méndez



Coasesor
Dr. Carlos Guerrero Salazar



Coasesor
Dr. Juan Antonio Aguilar Garib



Vo. Bo.
M.C. Roberto Villarreal Garza
División de Estudios de Postgrado

San Nicolás de los Garza, N.L., Febrero de 1997.

DEDICATORIA

*A **DIOS** por permitirme vivir y disfrutar de tantos momentos y experiencias a lo largo de mi vida.*

*A mis **PADRES**, Oralia y Margarito, por la visión que tuvieron desde que éramos niños mis hermanos y yo para que estudiáramos una carrera profesional, ayudándonos a conseguirlo, sacrificándose y desvelándose algunas veces. Ni que decir en estos estudios de post-grado. Y en general en todos los aspectos, pues siempre me han apoyado y permitido que escoga la opción que yo considere más conveniente.*

*A mis **HERMANOS**, Ana Leonor y J. Margarito con quienes he aprendido a dar gracias a DIOS por los padres que nos ha dado y por permitirnos hacerle frente a las dificultades de la vida.*

*A **TODAS LAS PERSONAS** con las que he compartido algún momento de mi vida, pues me doy cuenta de que no hay nadie en el mundo del que no aprenda algo.*

“Si te atrae una lucecita síguela, si te lleva al pantano ya saldrás de él, pero si no la sigues toda la vida te la pasarás pensando que quizá era tu estrella”.

Séneca.

AGRADECIMIENTOS

Al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología** por su apoyo económico para realizar estos estudios de Maestría.

A mi Alma Mater, la **Universidad Autónoma de Nuevo León** por todos los apoyos brindados a través de tanta gente, entre ellos los profesores del Doctorado en Ingeniería de Materiales (DIMAT) de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica en la realización de mis estudios.

En especial al Dr. Ubaldo Ortiz Méndez por asesorarme en la realización de esta tesis y a los Drs. Carlos Guerrero Salazar y Juan A. Aguilar Garib como revisores de la misma. A los tres también por brindarme su amistad.

A la empresa Magnelec del Grupo Industrial Peñoles por las facilidades prestadas para la realización de esta investigación, en especial al Dr. Tushar Kanti Das R. y el M.C. Guadalupe A. Castillo R. por su sugerencia al escoger el tema de tesis.

A todos los profesores del DIMAT, en especial al Dr. Rafael Colás Ortiz por su apoyo brindado en todos los aspectos, pero sobre todo por su insistencia para que terminará mis estudios.

A todos los alumnos y compañeros del DIMAT, muchos ya graduados, algunos ya Drs., con los que compartí momentos tan maravillosos dignos de recordarlos por el resto de mi vida. En especial a Carlos, Rodrigo, Eulogio, Moisés, Julio, Martín, Alán, Jose Luis, Sigifredo, Martha, Pablo, José Antonio, Ma. Idalia, Ana María, Paty, José y Jesús, por mencionar solo algunos de tantos y tantos verdaderos amigos que encontré aquí y de los que recibí todo su apoyo desde el principio hasta el fin.

INDICE

DEDICATORIA	i
AGRADECIMIENTOS	ii
RESUMEN	1
CAPITULO 1.- INTRODUCCION	2
CAPITULO 2.- ANTECEDENTES	5
2.1.- La magnesia y su obtención.	5
2.2.- Propiedades de la magnesia.	8
2.2.1.- Propiedades físicas.	8
2.2.2.- Propiedades eléctricas.	9
2.2.1.- Propiedades térmicas.	10
2.3.- Descripción del proceso de fusión de MgO	12
2.3.1.- Descripción de las partes del horno.	12
2.3.1.1.- Base.	12
2.3.1.2.- Coraza.	13
2.3.1.3.- Materia prima y su alimentación.	15
2.3.1.4.- Los electrodos y la fuente de energía.	15
2.3.2.- Funcionamiento del horno.	16
2.3.2.1.- Inicio de la fusión.	16
2.3.2.2.- Fusión.	17
2.3.2.3.- Terminación del proceso.	18

CAPITULO 3.-	DESARROLLO DEL MODELO	20
3.1.-	Fundamentos teóricos de transferencia de calor.	20
3.2.-	Métodos para resolver la ecuación de conducción.	26
3.2.1.-	Consideraciones y suposiciones en el sistema.	26
3.3.-	Métodos numéricos en transferencia de calor.	28
3.3.1.-	Selección del método numérico.	29
3.3.2.-	Volumen de control o de balance de calor.	30
3.3.2.1.-	Esquemas explícito, implícito y Crank-Nicholson.	33
3.4.-	Aplicación del método numérico.	35
3.4.1.-	Discretización y condiciones de frontera.	35
3.4.2.-	Generación del programa.	42
3.4.3.-	Prueba del programa.	43
CAPITULO 4.-	DESARROLLO EXPERIMENTAL	46
4.1.-	Introducción.	46
4.2.-	Selección de la técnica termométrica.	46
4.3.-	Experimentación en la planta.	48
CAPITULO 5.-	RESULTADOS Y DISCUSION	50
5.1.-	Introducción.	50
5.2.-	Análisis de resultados experimentales.	51
5.3.-	Simulación del proceso.	53
5.3.1.-	Graficas de temperatura vs. tiempo.	53
5.3.2.-	Termogramas.	69
CAPITULO 6.-	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	75

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	77
LISTA DE TABLAS	79
LISTA DE FIGURAS	80
ANEXO	82
RESUMEN AUTOBIOGRAFICO	83

RESUMEN

El objetivo de este trabajo es explicar el origen de los puntos o zonas calientes que aparecen en la coraza de acero del horno de arco eléctrico durante el proceso de fusión de óxidos de magnesio.

Con este objetivo en mente se procedió a hacer una investigación del comportamiento térmico que tiene el MgO en todo el proceso de fusión y su interacción con la coraza de acero y los electrodos de grafito que por medio de electricidad suministran la energía necesaria para fundirlo.

Contando con los datos necesarios involucrados en la fusión así como las descripciones matemáticas de los fenómenos involucrados se procedió a generar un modelo térmico computacional.

Los resultados de la simulación se compararon con resultados experimentales obtenidos directamente del proceso normal en la planta.

La desviación en el comportamiento de la temperatura contra tiempo de los resultados experimentales, contra los predichos no fue mayor de un 13% y solo en un intervalo de 10 minutos mientras en los 170 minutos restantes que dura el proceso de fusión el error fue menor.

CAPITULO 1

INTRODUCCIÓN

La magnesia u óxido de magnesio (MgO) electrofundido es un material cerámico que se utiliza para fabricar ladrillos refractarios, entre otras cosas.

La obtención de magnesia electrofundida se lleva a cabo mediante la fusión de MgO sinterizado. Como el punto de fusión del material es de 2800 °C la manera más rentable para fundirlo que se conoce hasta el momento es a través de energía eléctrica.

El proceso más utilizado es el de fusión en horno de arco eléctrico, el cual está muy poco documentado debido al escaso intercambio de información entre las compañías que lo poseen.

En el horno el material se funde por medio de la energía radiante desprendida del arco.

En este estudio el horno consiste principalmente de un cilindro hueco formado con placa de acero de 12.75 mm. de espesor y tres electrodos formados por barras de grafito alimentados por energía eléctrica trifásica.

Para iniciar la fusión los tres electrodos se conectan entre sí en el centro de la base del horno. Éste se encuentra vacío en estos momentos, así que entre la pared del horno y el arco eléctrico no existe nada más que aire. La pared del horno sufre un calentamiento muy rápido pero inmediatamente se alimenta una cantidad suficiente de MgO, cubriendo tanto el arco eléctrico como las paredes del horno. Esta magnesia actúa como aislante térmico

mientras la temperatura sea inferior a 800 °C, porque a temperaturas mayores su conductividad térmica aumenta.

El problema se presenta cuando la magnesia en el centro del horno junto a los electrodos eleva su temperatura. Este incremento de temperatura en el MgO, combinado con un acomodo no uniforme del material dentro del horno, provoca que se transmita el calor hasta la pared por conducción y radiación térmica, elevando la temperatura en algunas zonas de la pared, a las cuales se les conoce como zonas o puntos calientes, por la coloración rojiza que toma el acero a temperaturas cercanas a su punto de fusión (1550 °C). Si la pared llegara a perforarse, el MgO saldría por ahí, provocando que se detenga el proceso, dando por consiguiente una baja producción de MgO electrofundido, perdiendo tiempo operativo y la energía latente que se podría haber utilizado para fundir más MgO.

Con estos antecedentes y dada la importancia de los problemas que genera el proceso, se buscó la manera de predecir de qué forma se calienta el horno para evitar que aparezcan los puntos calientes, pretendiendo a la vez optimizar el proceso.

La manera más completa y económica de hacer lo anterior es desarrollando un simulador computacional que contemple desde el inicio del proceso la transferencia de calor desde el centro hasta la pared del horno. Por medio de un registro experimental de las temperaturas en la pared del horno se podría validar las predicciones arrojadas por el simulador.

Queda de manifiesto que el objetivo que tiene este trabajo es el de generar este programa y realizar los experimentos.

Después de realizada una búsqueda bibliográfica exhaustiva no se encontraron simuladores computacionales aplicados a la fusión de MgO.

La metodología seguida para desarrollar el simulador inició con el estudio de los materiales involucrados, de las formas en que se transfiere el calor, de la descripción matemática de dichos fenómenos y de los métodos numéricos a aplicar para obtener la solución de las ecuaciones resultantes. Se

escogió también un lenguaje de programación que permitiera obtener un programa lo más óptimo posible y no muy complejo.

Para llevar a cabo la experimentación, la metodología seguida consistió primero en seleccionar varios puntos de la coraza representativos del problema, registrar sus temperaturas por medio de termopares a medida que avanza la fusión, realizando la lectura varias veces durante la operación normal de la planta.

Finalmente, se comparan los resultados y se obtiene la desviación entre los valores obtenidos por el simulador y los experimentales, estableciendo así el grado de exactitud de nuestro modelo.

CAPITULO 2

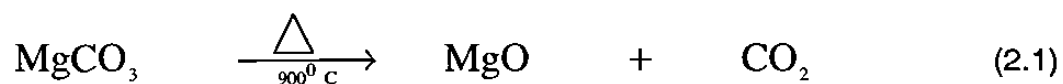
ANTECEDENTES

2.1 LA MAGNESIA Y SU OBTENCION.

Se denomina “magnesia” al óxido de magnesio (MgO), mineralógicamente se conoce como periclase, la cual puede ser obtenida de manera natural o sintética.

Magnesia natural.

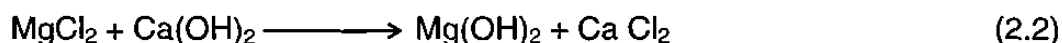
Así se le llama al producto que obtenemos al calcinar la magnesita (MgCO₃), la cual se descompone en óxido de magnesio y dióxido de carbono al calentarla a temperaturas superiores a los 900 °C. Químicamente esta reacción la podemos representar de la siguiente manera:



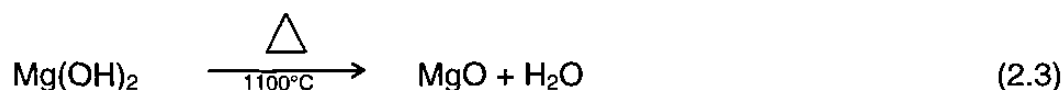
Magnesia sintética.

Existen dos formas de obtener magnesia de manera sintética: a partir de agua de mar o partiendo de salmueras.

A partir de agua de mar básicamente consiste en adicionar cal, la cual reacciona con el cloruro de magnesio presente en el agua produciendo hidróxido de magnesio.

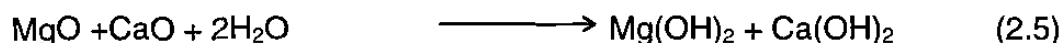
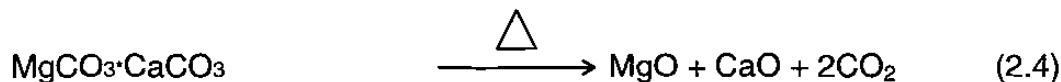


El hidróxido se quema aproximadamente a 1100 °C para obtener el MgO.

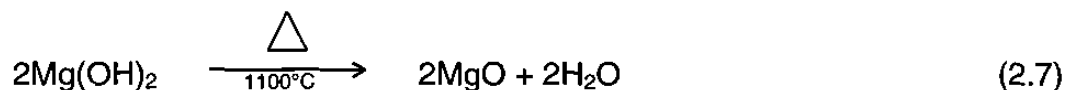


Después de esto se compacta y sinteriza en forma de briquetas a una temperatura superior a 1800 °C.

Para obtener MgO a partir de salmueras [1], se hacen reaccionar las sales ricas en magnesio con cal para obtener cloruro de magnesio, el cual a su vez se hace reaccionar con el hidróxido de calcio proveniente de la calcinación de dolomita ($\text{MgCO}_3 \cdot \text{CaCO}_3$) produciéndose así una fase sólida de hidróxido de magnesio Mg(OH)_2 .



El hidróxido es quemado a una temperatura de 1100 °C para producir el óxido de magnesio.



Al tener ya MgO se sinteriza a una temperatura superior a 2000 °C, esto con el fin de obtener briquetas como un producto más denso, refractario y sinterizado, el cual es llamado magnesia sinterizada.

De los dos tipos de magnesia mencionados anteriormente, la sintética es la que se utiliza principalmente en la producción de materia prima para la industria de refractarios especiales, tales como los de MgO-C [2].

De las dos formas de producción de magnesia sintética, es el óxido de magnesio a partir de salmueras el de interés en esta tesis, pues de acuerdo a estudios realizados por otros investigadores [3], la magnesia obtenida de esta manera es la que tiene mayor pureza y por lo tanto cuenta con mejores propiedades físicas (por ejemplo mayor densidad), características necesarias para obtener MgO electrofundida con la más alta calidad posible en estos momentos.

2.2 PROPIEDADES DE LA MAGNESIA.

2.2.1 PROPIEDADES FÍSICAS.

Tabla 1.- Propiedades físicas del MgO [4].

Densidad específica	3.6 gr/cm ³
Peso molecular	40.3 gr/gr-mol
Estructura cristalina	Cúbica centrada en las caras
Parámetro de red	0.4213
Dureza escala de Mohs	5.5
Índice de refracción	1.732

La estructura cristalina, cúbica centrada en las caras, se observa en la figura 1, formada por aniones (oxígeno) y cationes (magnesio).

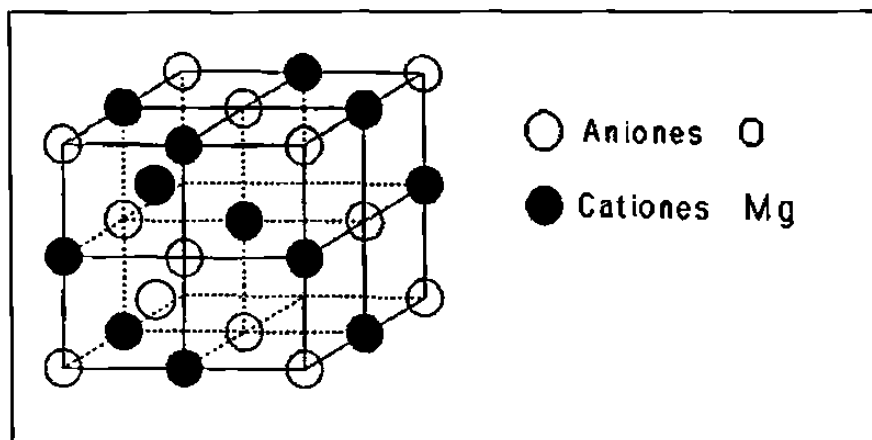


Fig.1 Celda unitaria de MgO.

2.2.2 PROPIEDADES ELÉCTRICAS

El óxido de magnesio es un cerámico y como la gran mayoría de los cerámicos tradicionales es un buen aislante eléctrico, de hecho está considerado como uno de los mejores [3]. La figura 2, muestra el valor de su conductividad eléctrica como función de la temperatura. Algunos valores reportados de resistividad a ciertas temperaturas aparecen en la tabla 2.

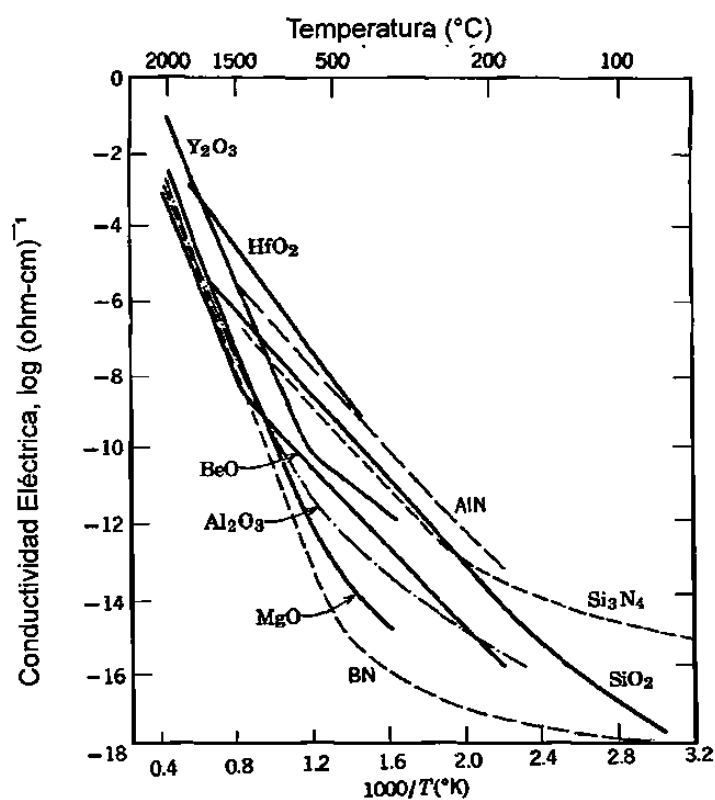


Fig. 2 Conductividad eléctrica de los mejores aislantes cerámicos [4]

Tabla 2. Resistividad eléctrica del MgO a diferentes temperaturas.

Temperatura (°C)	Resistividad ($\Omega\text{-cm}$)
27	1.13×10^{15}
727	2×10^7
1227	4×10^2

2.2.3 PROPIEDADES TÉRMICAS

Como ya se mencionó este material se utiliza principalmente en la fabricación de refractarios, por lo que es de esperarse que tenga muy buenas características térmicas. Su punto de fusión es de 2800 °C [4] y es un buen aislante térmico. Su conductividad térmica varía con la temperatura [4], como se muestra en la figura 3.

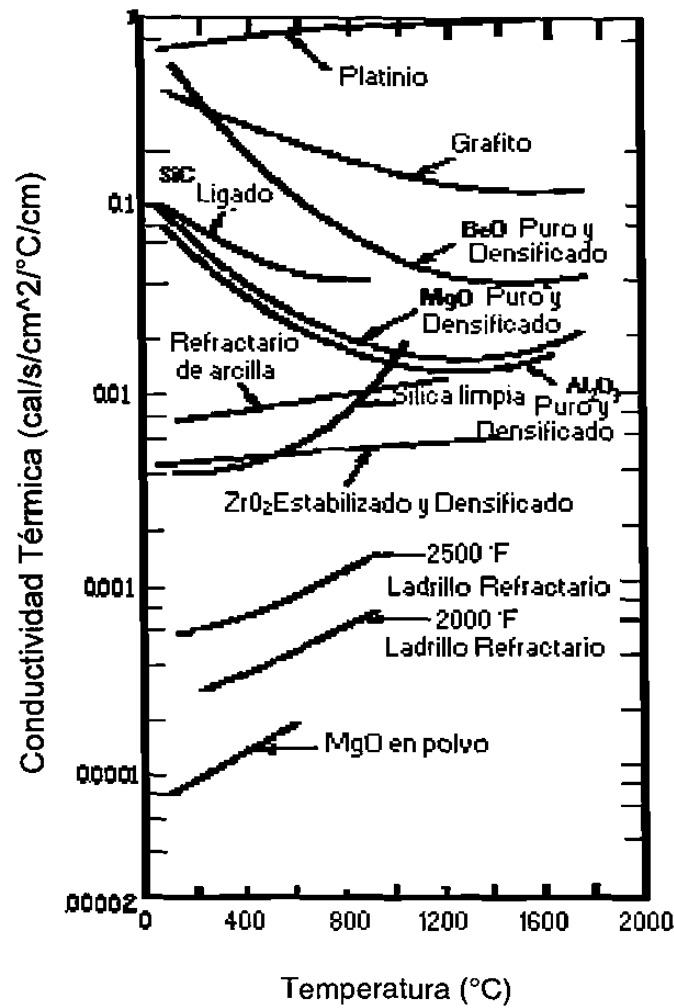


Fig. 3 Conductividad Térmica de algunos materiales.

Utilizando los valores reportados en la figura 3 para el MgO puro y densificado y mediante una regresión polinomial obtenemos la siguiente expresión para la conductividad térmica como función de la temperatura:

$$k_{(\text{MgO})} = 2180 - 2.7T + .001T^2 \quad \frac{\text{J}}{\text{min.-m} \cdot \text{K}} \quad (2.8)$$

válida sólo entre 100 y 2073 K, las unidades utilizadas en esta ecuación son diferentes a las de la figura 3 pero son las que se usan en el simulador.

La capacidad Calorífica del MgO también varía con la temperatura, ese comportamiento ya ha sido reportado como [5]:

$$C_{p(\text{MgO})} = 1127.78 + 0.1243 \times T - 21672915.36 / T^2 \quad \text{J / kg - K} \quad (2.9)$$

válida en el rango de 273 a 2073 K.

2.3 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE FUSIÓN DE MgO.

2.3.1 DESCRIPCIÓN DE LAS PARTES DEL HORNO.

2.3.1.1 BASE.

La base del horno es un cilindro hueco formado por una placa de acero al carbón (A36 código ASME) con un diámetro de 200 cm., un espesor de 1.27 cm. y una altura de 40 cm. como se muestra en la figura 4.

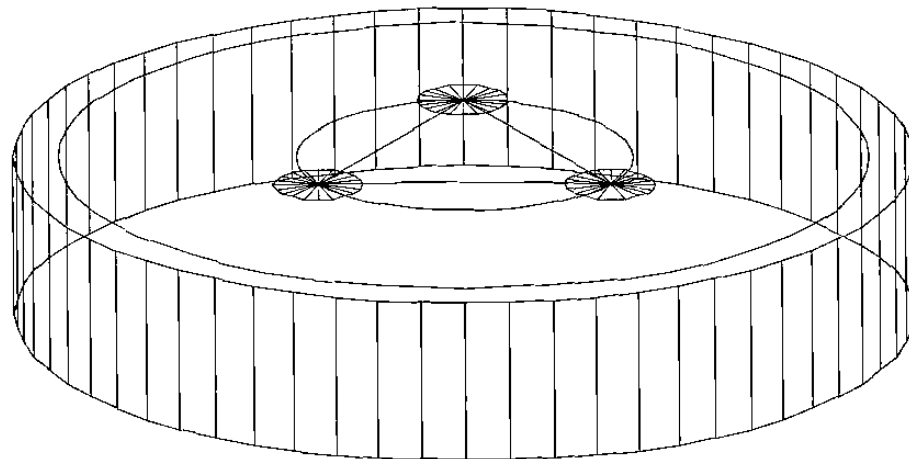


Fig. 4. Representación de la base del horno.

La base, antes de la fusión se llena con MgO sinterizado que en fusiones anteriores no llegó a fundirse, a este tipo de material le llamamos de recicló. Es en esta parte del horno donde se colocan en su parte superior y centradas, tres barras de grafito (2.54x2.54x12.25cm) unidas entre sí formando un triángulo. Este arreglo es cubierto casi en su totalidad con briquetas de MgO a fundir, dejando descubiertos los vértices de unión. La colocación de las barras de esta manera obedece a que los electrodos al inicio del proceso necesitan estar en corto circuito, por lo tanto se hacen coincidir con los vértices de unión y al hacer pasar electricidad por ellos se forma un arco eléctrico.

2.3.1.2 CORAZA.

La coraza es la pared del horno donde se contiene el material a fundir y el fundido. Tiene una forma cercana a la de un cono truncado hueco, como se puede observar en la figura 5. Está hecho de acero al carbón comercial A36 (código ASME) con un espesor de 2.54 cm. y una altura de 2 mts., tiene un radio inferior de 105 cm. y, uno superior de 90 cm.

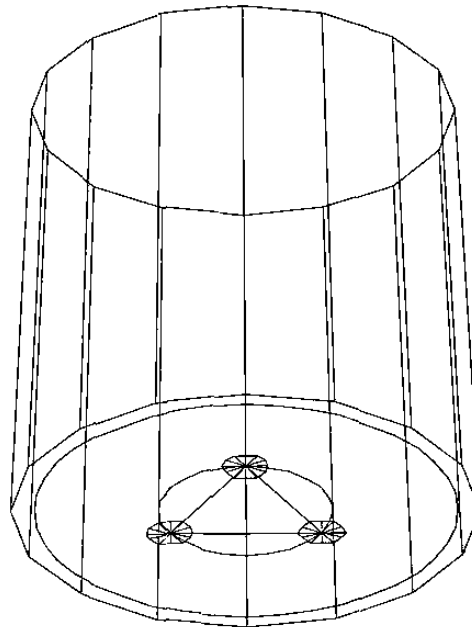


Fig. 5 Representación de la coraza del horno.

La capacidad del horno es directamente el peso del material que ocupa el volumen de la coraza, esto es el volumen del horno (aprox. 6 m^3) multiplicado por la densidad del MgO dándonos como resultado cerca de 21,500 Kg. El MgO sinterizado que se utiliza como materia prima está en forma de briquetas, por lo que existen muchos espacios libres. Si se considera que el espacio vacío equivale a un 50% del volumen, sólo unos 10,000 Kg. de MgO serán los que quepan dentro del horno. De esta carga sólo una fracción (un 60% aprox.) resulta en producto electrofundido, debiéndose esto a las condiciones de proceso que serán señaladas en las siguientes secciones de este capítulo.

2.3.1.3 MATERIA PRIMA Y SU ALIMENTACIÓN.

La materia prima (MgO sinterizado) en forma de briquetas se almacena en tolvas. El material se alimenta directamente de las tolvas al horno por medio de alimentadores helicoidales.

2.3.1.4 LOS ELECTRODOS Y LA FUENTE DE ENERGÍA.

La forma en que se logra la fusión del MgO es mediante la energía del arco eléctrico producido entre los tres electrodos conectados a un transformador de voltaje, con capacidad para manejar 6 MW de potencia, el cual se alimenta directamente de la red eléctrica trifásica. Esta potencia se alimenta a través de cables especiales hasta los electrodos colocados en el centro del horno, donde se produce el arco.

Los tres electrodos están fabricados de grafito y tienen las dimensiones siguientes: un diámetro de 31.2 cm con una longitud de 300 cm.

Los tres electrodos forman un triángulo equilátero, coincidiendo con los vértices del triángulo formado por las tres barras de grafito cubiertas parcialmente en la superficie de la cama de MgO sinterizado de la base del horno, ver figura 6.

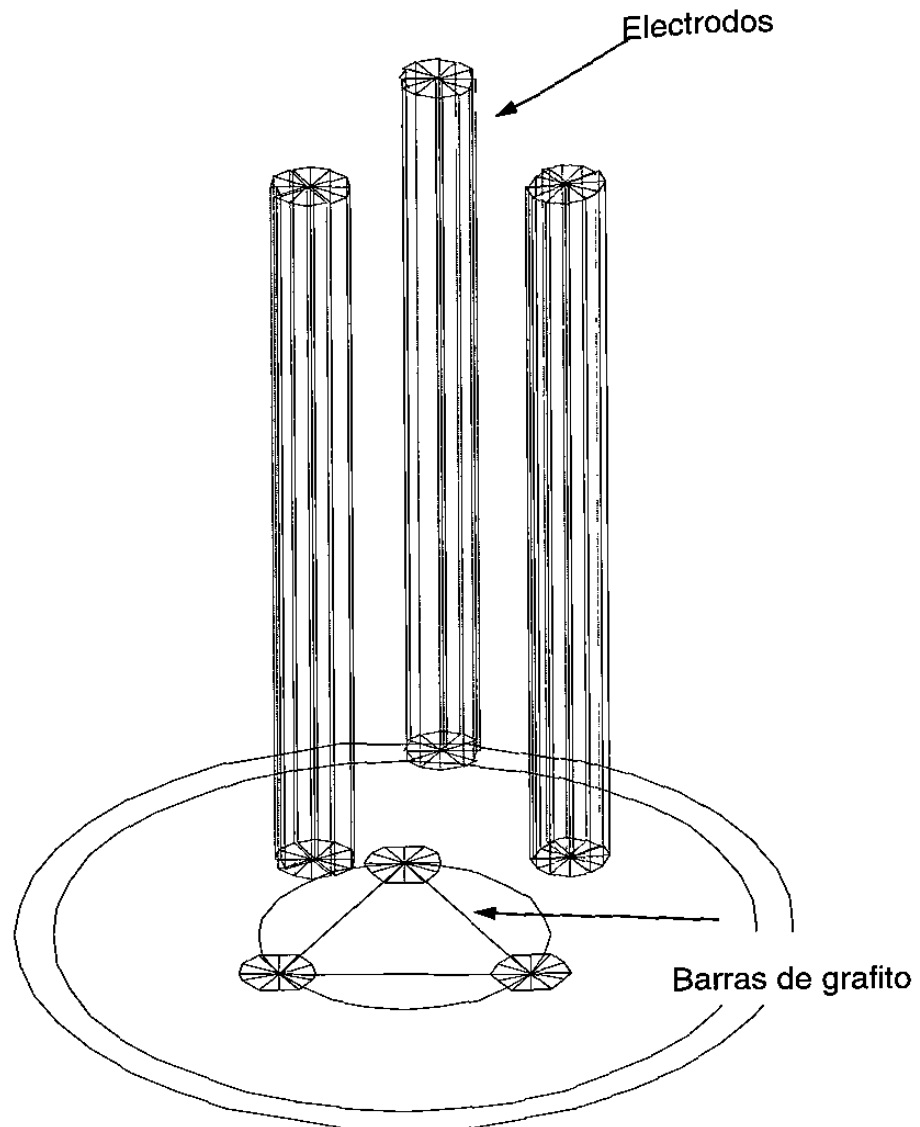


Fig. 6 Esquema representativo de los electrodos.

2.3.2 FUNCIONAMIENTO DEL HORNO.

2.3.2.1 INICIO DE LA FUSIÓN.

Debido a que el MgO no es conductor eléctrico a temperatura ambiente, y dado que no es posible iniciar el arco sin la utilización de un conductor, se hace uso de barras de grafito colocadas en la base. Esta última se prepara cubriendo

casi en su totalidad las barras de grafito con MgO sinterizado. Una vez hecho esto se coloca sobre la base la coraza de acero, encontrándose listo el horno para colocarse en el lugar donde los electrodos ya están preparados y conectados al circuito eléctrico por encima del horno, para que éste se acomode.

Los electrodos se mueven dentro del horno para hacer contacto con las barras de grafito. Habiendo concluído esta operación el horno se encuentra listo para iniciar la fusión.

Por medio de los interruptores se hace pasar la corriente por las tres fases (o los tres electrodos) provocando un corto circuito en la delta que forman entre sí. Una vez generado el arco, éste se cubre con material que se carga por la parte superior del horno, en diferentes posiciones.

2.3.2.2 FUSIÓN.

La radiación, que se genera continuamente en el arco, se transmite por conducción al material, el cual empieza a fundirse después de alcanzar los 2800 °C. A temperaturas superiores a 1227 °C el material deja de comportarse como un aislante eléctrico, permitiendo la conducción de electricidad, aunque con una gran resistencia. Al consumirse las barras de grafito, el arco continúa existiendo hasta que el material alimentado cubre los electrodos, punto en el cual el arco se interrumpe. La generación de calor continúa ahora por el efecto Joule (ec. 2.10). En nuestro caso a esta forma de generación se le llama de "arco sumergido".

$$P = I^2 \times R \quad (2.10)$$

En donde, P (Joules/seg.) representa la potencia calorífica generada por la resistencia eléctrica R (ohms) al pasar la corriente eléctrica I (amperes) a través del material.

La circulación de corriente se incrementa hasta cierto valor debido a la disminución de la resistencia eléctrica. Esta variación se utiliza como retroalimentación para mover los electrodos ya sea manual o automáticamente a una altura superior con respecto a la posición de la base.

Al moverse los electrodos quedan de nuevo en contacto con material sin fundir, disminuyendo la densidad de corriente, por lo que el material se funde sólo por conducción. Se alimenta más material tratando de conseguir el mismo nivel del material cubriendo el arco. Nuevamente se elevan los electrodos pues la densidad de corriente se ha incrementado y al variar la altura de los electrodos se consigue que la densidad de corriente disminuya hasta el valor necesario para continuar la fusión en ese lugar, al mismo tiempo se alimenta más material. Esta operación se realiza continuamente.

Los contratiempos más comunes en el proceso son la aparición de puntos calientes en la pared de acero del horno, que pueden provocar que se detenga la fusión debido a que estas zonas de la coraza fácilmente se pueden perforar, pudiendo salir briquetas de MgO y en un descuido hasta material electrofundido.

Normalmente, el material sin fundir rodea al fundido aislándolo térmicamente de la pared y por su muy baja conductividad térmica se retarda la conducción del calor. Si esto no sucediera, la conducción del calor sería mayor entre las briquetas cercanas al acero provocando que en ese lugar la coraza se calentara a temperaturas cada vez más elevadas, acercándose al punto de fusión del acero (cerca de $1550\text{ }^{\circ}C$).

2.3.2.3 TERMINACIÓN DEL PROCESO.

Cuando el horno se encuentra completamente lleno de material, la fusión se detiene retirando los electrodos.

La base y la coraza se mueven juntos y se dejan enfriar a temperatura ambiente por unos 8 días.

El material electrofundido es nuestro producto. El material que rodea a éste y que no se fundió se recicla, utilizándose nuevamente como carga.

CAPITULO 3

DESARROLLO DEL SIMULADOR COMPUTACIONAL

3.1 FUNDAMENTOS TEÓRICOS SOBRE TRANSFERENCIA DE CALOR.

Dentro de los fenómenos de transporte, la transferencia de calor es la ciencia que estudia el transporte de energía que ocurre en un medio dado, como resultado de una diferencia de temperatura, excepto en la radiación. Esta ciencia busca predecir la rapidez a la que se realizará este intercambio de energía bajo ciertas condiciones específicas.

Existen tres mecanismos de transferencia de calor:

- Conducción,
- Convección,
- Radiación.

De manera general los dos primeros mecanismos se dan cuando existe una diferencia de temperatura entre dos regiones, habiendo una transferencia de energía de la región de alta temperatura a la de baja temperatura.

- **Conducción.**

La conducción se da dentro de todos los materiales ya sean sólidos, líquidos o gaseosos. La rapidez de la transferencia de energía es proporcional al gradiente de temperatura según la Ley de Fourier [6], expresada matemáticamente para el caso de una dimensión como:

$$q = -kA \frac{\partial T}{\partial x} \quad (3.1)$$

En la ecuación anterior, q representa la rapidez de transferencia de calor, $\partial T / \partial x$ es el gradiente de temperatura en la dirección del flujo de calor, en nuestro caso en la dirección x , A es el área perpendicular a la dirección del flujo, k es la conductividad térmica del material y el signo menos es una convención adoptada para indicar que el calor fluye en dirección contraria al gradiente de temperatura.

También intervienen en la transferencia de calor algunos tipos de energía, las cuales lo hacen independientemente del modo en que se conduce el calor. Estos tipos energía son:

La energía generada:

$$\text{Energía generada dentro del cuerpo} = \dot{q} A dx \quad (3.2)$$

y el cambio en la energía interna:

$$\text{Cambio en la energía interna} = \rho C \frac{\partial T}{\partial \tau} dx \quad (3.3)$$

en donde \dot{q} es la energía generada por unidad de volumen, C es la capacidad Calorífica, ρ es la densidad del material y el término τ representa el tiempo.

Haciendo un balance en tres dimensiones y utilizando las relaciones anteriores [6] se puede llegar a la ecuación general siguiente:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q} = \rho C \frac{\partial T}{\partial \tau} \quad (3.4)$$

Una simplificación a nuestro problema sería al considerar que el horno (la coraza) tiene forma geométrica cilíndrica, entonces la ecuación anterior es más conveniente expresarla en coordenadas cilíndricas [6]:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(rk \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(k \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q} = \rho C \frac{\partial T}{\partial \tau} \quad (3.5)$$

El análisis en este estudio se basa en la resolución de la ecuación anterior utilizando las condiciones de frontera de convección y radiación.

- **Convección.**

Es el intercambio de energía entre un fluido y una superficie o interfase.

Por ejemplo, cuando un material caliente se deja en un lugar con una temperatura inferior se enfriará después de un tiempo por la acción del aire que

arrastrará de su superficie el calor del material. Los fluidos (gases y líquidos) se encargan de transferir el calor o de enfriar el material. Este fenómeno también se realizaría de manera inversa si el ambiente se encuentra a una temperatura superior a la del material.

Existen dos tipos de convección: libre y forzada.

La convección libre es aquella donde la transferencia de calor se da simplemente por el gradiente de temperatura entre el ambiente y el material, sin que el fluido se mueva mediante la aplicación de trabajo externo.

La convección forzada es aquella que se da cuando se provoca que el fluido se mueva a velocidades superiores por medio de algún dispositivo mecánico como por ejemplo un ventilador. A mayor velocidad del fluido habrá una mayor transferencia de calor.

El fenómeno de convección puede representarse matemáticamente mediante la Ley de Enfriamiento de Newton [6]:

$$q = hA(T_s - T_\infty) \quad (3.6)$$

En esta ley se establece que la rapidez de transferencia de calor está relacionada con la diferencia de temperatura total entre la pared y el fluido y el área de la superficie A . La cantidad h se llama coeficiente de transferencia de calor por convección.

El coeficiente de transferencia de calor depende de las propiedades del fluido, de la geometría del sistema y de las condiciones del mismo. En la tabla 4 se observan algunos valores de h para diferentes fluidos en diversos sistemas [7].

Tabla 3. Valores aproximados de transferencia de calor por convección[7].

Mecanismo	$h(W/m^2\text{-}^\circ C)$
Vapor de agua en condensación	5,676-113,536
Agua hirviendo	2838-28,384
Convección forzada, agua	283-17,030
Convección forzada, aire	28-567
Convección libre, aire	5.67-56.77

En este estudio se utiliza un valor promedio del coeficiente de transferencia de calor por convección para el aire en condiciones de convección libre ($25 W/m^2\text{-}^\circ C$) en la pared externa del horno. Estas condiciones son precisamente las que se tienen en la planta, sin utilizar otro tipo de enfriamiento.

- **Radiación**

A diferencia de los dos mecanismos anteriores de transferencia de calor, el calor por radiación puede transferirse incluso donde existe el vacío absoluto. A este mecanismo se le conoce como radiación electromagnética o radiación térmica. Cuando dos cuerpos ideales intercambian calor por radiación, el intercambio neto es proporcional a la diferencia de las temperaturas absolutas elevada cada una a la cuarta potencia. La relación que gobierna este fenómeno recibe el nombre de Ley de Radiación Térmica de Stefan-Boltzmann [6].

$$q = \sigma A(T_1^4 - T_2^4) \quad (3.7)$$

En donde σ es la constante de proporcionalidad conocida como Constante de Stefan-Boltzmann, con un valor de $5.669 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\cdot\text{K}^4$. La ecuación 3.7 se aplica solamente a los cuerpos negros. Para cuerpos reales o "grises" la ecuación se modifica a:

$$q = F_{\epsilon} F_g \sigma A (T_1^4 - T_2^4) \quad (3.8)$$

donde F_{ϵ} es la función de emisividad y F_g es la función geométrica de factor de vista. En este estudio se toma en cuenta la radiación producida por los electrodos de grafito radiando dentro de la coraza de acero, por lo que se provoca el precalentamiento de la pared del horno. Si consideramos que la energía producida entre los tres electrodos forma un cilindro que pasa por los tres vértices de la delta (ver figuras 4 y 7), es decir, que imaginariamente tenemos un cilindro que genera calor dentro del horno,

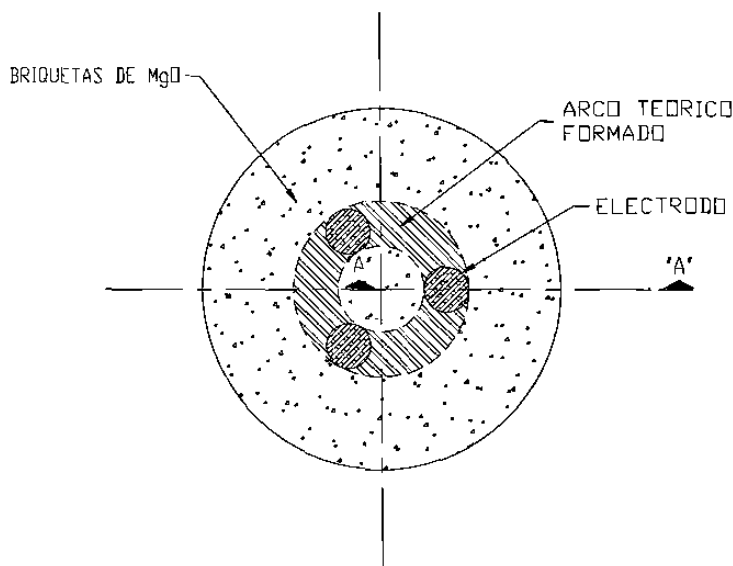


Fig. 7 Vista superior del horno mostrando el arco teórico formado.

entonces podemos aplicar la siguiente fórmula simplificada de intercambio de radiación entre dos superficies cilíndricas: [6]

$$q = \frac{\sigma A_1 (T_1^4 - T_2^4)}{1/\epsilon_1 + (A_1 / A_2)(1/\epsilon_2 - 1)} \quad (3.9)$$

donde A_1 y A_2 son las áreas de las superficies del círculo teórico y la coraza respectivamente, ϵ_1 y ϵ_2 son los valores de emisividad de energía radiante del grafito y el acero respectivamente. ϵ_1 y ϵ_2 varían con la temperatura. ϵ_1 varía de 0.81 a 0.79 y ϵ_2 varía de 0.20 a 0.32, [6].

3.2 MÉTODOS PARA RESOLVER LA ECUACIÓN DE CONDUCCIÓN.

No hay mayor problema en plantear las ecuaciones de convección y radiación para describir las condiciones de frontera, por lo que nos concentramos en resolver la ecuación de conducción (3.5).

El desarrollo del modelo se llevó a cabo utilizando el método numérico de balance de calor, éste fue escogido después de realizar el siguiente análisis.

3.2.1 CONSIDERACIONES Y SUPOSICIONES EN EL SISTEMA.

Las condiciones del proceso descritas en el Capítulo 2, nos llevan a obtener las siguientes consideraciones para desarrollar el modelo térmico:

- *Existe simetría angular con respecto a la fuente de calor, debido a esto, nuestro sistema puede ser analizado en dos dimensiones: radial (r) y axial (z).*

Debido a la consideración de simetría angular, la ecuación 3.5 se simplifica a la siguiente expresión:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(rk \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q} = \rho C \frac{\partial T}{\partial \tau} \quad (3.10)$$

- *Existe convección natural entre el medio ambiente y la pared, la pérdida de calor en las paredes externas del horno se deben en su mayoría a la convección natural entre el aire y la pared del horno.*

- *El material a fundir se carga a una temperatura ambiente constante.*

- *La fuente de energía tiene una generación de calor constante durante toda la fusión.*

- *Durante la fusión, la fuente de energía se mueve axialmente a intervalos de tiempo preestablecidos.*

- *La distribución del material dentro del horno es homogénea; aunque en la práctica el material dentro del horno está en forma de briquetas, en nuestro estudio consideramos el material como una fase continua en la que existe una cierta porosidad, ϵ , estimada según la carga de materia prima alimentada. Esta consideración se utiliza para obtener la conductividad térmica efectiva k_e , partiendo de la conductividad real k_s de un material continuo [8]:*

$$k_e = k_s (1 - \epsilon) \quad (3.11)$$

- *No existe movimiento de material ni de gases dentro del horno; debido a que dentro de éste se encuentra un lecho de material empaquetado, se considera que el efecto de la conductividad del material es mucho mayor al efecto de la convección de los gases por los poros, por lo que la transferencia de calor dentro del horno se lleva a cabo principalmente por conducción.*

- *El sistema tiene una geometría compleja, debido a que el material a fundir se encuentra en forma de briquetas alimentadas dentro del horno de una manera intermitente.*

- *El sistema físicamente es complejo, debido a que la fuente de energía varía su posición durante la fusión y existe un cambio de fase.*

- *Las propiedades térmicas varían con la temperatura, debido a esto, existen durante el proceso puntos separados espacialmente con conductividades diferentes.*

Por todo lo anterior, llegamos a la conclusión de que en el caso particular de nuestro sistema, una solución numérica es mucho más apropiada que una analítica, ya que ésta última está limitada a geometrías y situaciones relativamente simples.

3.3 MÉTODOS NUMÉRICOS EN TRANSFERENCIA DE CALOR.

Existen diversos métodos numéricos para resolver las ecuaciones de transferencia de calor, siendo los de mayor importancia, (dada su gran aplicación) los siguientes:

- Diferencias finitas
- Balance de calor o volumen de control
- Elementos finitos

El método de elementos finitos requiere de un amplio conocimiento teórico y práctico para la discretización del sistema y la implementación en un programa computacional.

De cualquier forma no se le utiliza en este trabajo debido a que se aplica a una forma geométrica fija. Este horno tiene una forma geométrica fija, pero al ver que el MgO a fundir varía dentro del horno y que el espacio sobre el está lleno con aire, gases y en algunas partes por los electrodos, podemos decir que nuestro sistema no tiene una forma geométrica fija ya que nosotros no consideramos el efecto del aire y los gases dentro del horno, y al utilizar el método de elementos finitos se vuelve necesario considerarlos aunque desconozcamos las reacciones que se producen.

3.3.1 SELECCIÓN DEL MÉTODO NUMÉRICO.

En la referencia [7], se encuentran algunas consideraciones que son de gran utilidad para poder hacer dicha selección.

Con el método de diferencias finitas algunos sistemas no pueden ser resueltos fácilmente cuando existen ciertas complicaciones como las siguientes:

- Propiedades térmicas que varían espacialmente.
- Tamaños desiguales de los nodos.
- Formas variables de nodo.
- La generación de calor que puede variar con el tiempo y la posición.
- Los efectos adicionales de la radiación.
- Cambios de fase.

En sistemas con algunas de las anteriores complicaciones es mucho más sencillo y poderoso utilizar el método de balance de calor, su sencillez se debe a la percepción física que nos da al utilizarlo.

En base a todo lo descrito llegamos a la conclusión de seleccionar el método de balance de calor, porque para el problema que nos ocupa es la mejor manera de lidiar con las complicaciones explicadas en los párrafos anteriores.

Aunque también hay que mencionar que el método de balance de calor tiene como desventajas el de que una geometría diferente a una rectangular (por ejemplo círculos) no puede ser exactamente discretizada porque a través de puros rectángulos trata de formar la misma figura, y entre más grande sea el tamaño de los rectángulos o cuadros, más alejado está de la realidad, este problema se evitaría utilizando el método de elementos finitos, el cual ya vimos

por qué no fue utilizado en la presente investigación. No afecta en nuestro estudio, debido a que el área discretizada es rectangular.

3.3.2 VOLUMEN DE CONTROL O DE BALANCE DE CALOR.

El método numérico de volumen de control o de balance de calor es de fácil aplicación por la percepción física que nos da al discretizar el sistema. Existen varias maneras de obtener las ecuaciones básicas para discretizar cualquier geometría. La demostración a continuación se aplica a una dimensión en coordenadas cilíndricas y como veremos después, el método se puede generalizar fácilmente para 2 y 3 dimensiones.

La ecuación diferencial que nos describe el sistema en una dimensión r (radial) en estado transitorio es la siguiente:

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(rk \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (3.21)$$

La discretización por la técnica de volumen de control consiste en considerar el punto "P" como el punto de interés (fig. 7) y los puntos "E" y "O" como los nodos vecinos, denotaremos a las temperaturas "anteriores" T_P^0 , T_E^0 , T_O^0 , y los valores "nuevos" (desconocidos) como T_P^1 , T_E^1 , T_O^1 al tiempo $t + \Delta t$.

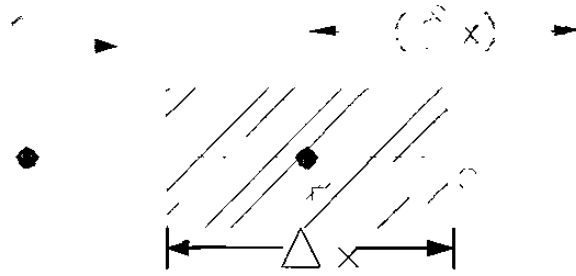


Fig. 8 Representación del volumen de control en una dimensión.

Sí integramos la ecuación (3.21) sobre el volumen de control y sobre el intervalo de t a $t + \Delta t$, quedaría como sigue:

$$\rho C \int_0^e \int_t^{t+\Delta t} \frac{\partial T}{\partial t} dt dx = \int_t^{t+\Delta t} \int_0^e \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(rk \frac{\partial T}{\partial r} \right) dr dt \quad (3.22)$$

asumiendo que el valor de T en el nodo es el mismo en todo el volumen de control, tendremos

$$\rho C \int_0^e \int_t^{t+\Delta t} \frac{\partial T}{\partial t} dt dx = \rho C \Delta x (T_p^1 - T_p^0) \quad (3.23)$$

El término de la derecha de la ecuación 3.22 puede derivarse y convertirse en dos términos integrales:

$$\int_t^{t+\Delta t} \int_0^e \frac{\partial}{\partial r} \left(k \frac{\partial T}{\partial r} \right) dr dt + \int_t^{t+\Delta t} \int_0^e \frac{k}{r} \frac{\partial T}{\partial r} dr dt \quad (3.24)$$

quedando después de integrar con respecto a r ,

$$\int_t^{t+\Delta t} \left[\frac{k_e (T_E - T_p)}{(\delta r)_e} - \frac{k_o (T_p - T_o)}{(\delta r)_o} \right] \left[1 + \text{Ln} \left(\frac{r_e}{r_o} \right) \right] dt \quad (3.25)$$

y la expresión completa,

$$\rho C \Delta x (T_p^1 - T_p^0) = \int_t^{t+\Delta t} \left[\frac{k_e (T_E - T_p)}{(\delta r)_e} - \frac{k_o (T_p - T_o)}{(\delta r)_o} \right] \left[1 + \text{Ln} \left(\frac{r_e}{r_o} \right) \right] dt \quad (3.26)$$

Para que la ecuación anterior quede totalmente determinada, se debe suponer la forma en que T_p , T_E , y T_o varían con respecto al tiempo. Algunas de estas relaciones se pueden generalizar de la siguiente manera:

$$\int_t^{t+\Delta t} T_p dt = [f T_p^1 + (1-f) T_p^0] \Delta t \quad (3.27)$$

donde f es un factor con un valor entre 0 y 1. Usando expresiones similares para T_E y T_o y reordenando nos queda:

$$\begin{aligned} a_p T_p^1 &= a_E [f T_E^1 + (1-f) T_E^0] + a_o [f T_o^1 + (1-f) T_o^0] \\ &+ [a_p^0 - (1-f) a_E - (1-f) a_o] T_p^0 \end{aligned} \quad (3.28)$$

en donde

$$a_E = \frac{k_e}{(\delta r)_e} \left[1 + \text{Ln} \left(\frac{r_e}{r_o} \right) \right],$$

$$a_o = \frac{k_o}{(\delta r)_o} \left[1 + \text{Ln} \left(\frac{r_e}{r_o} \right) \right],$$

$$a_p^0 = \frac{\rho C \Delta r}{\Delta t},$$

$$a_p = f a_E + f a_o + a_p^0$$

3.3.2.1 ESQUEMAS EXPLÍCITO, IMPLÍCITO Y CRANK-NICHOLSON.

En algunos casos el valor que recibe el factor f da lugar a esquemas bien conocidos. En particular, si $f = 0$ nos da el esquema explícito, si $f = 0.5$ obtenemos el esquema Crank-Nicholson, y si $f = 1$ el completamente implícito.

Podemos observar en la figura 8 los comportamientos de cada uno de los esquemas. Así por ejemplo, vemos que en el esquema Crank-Nicholson es directamente proporcional la variación de la temperatura contra el tiempo, este esquema es válido para incrementos muy pequeños de tiempo.

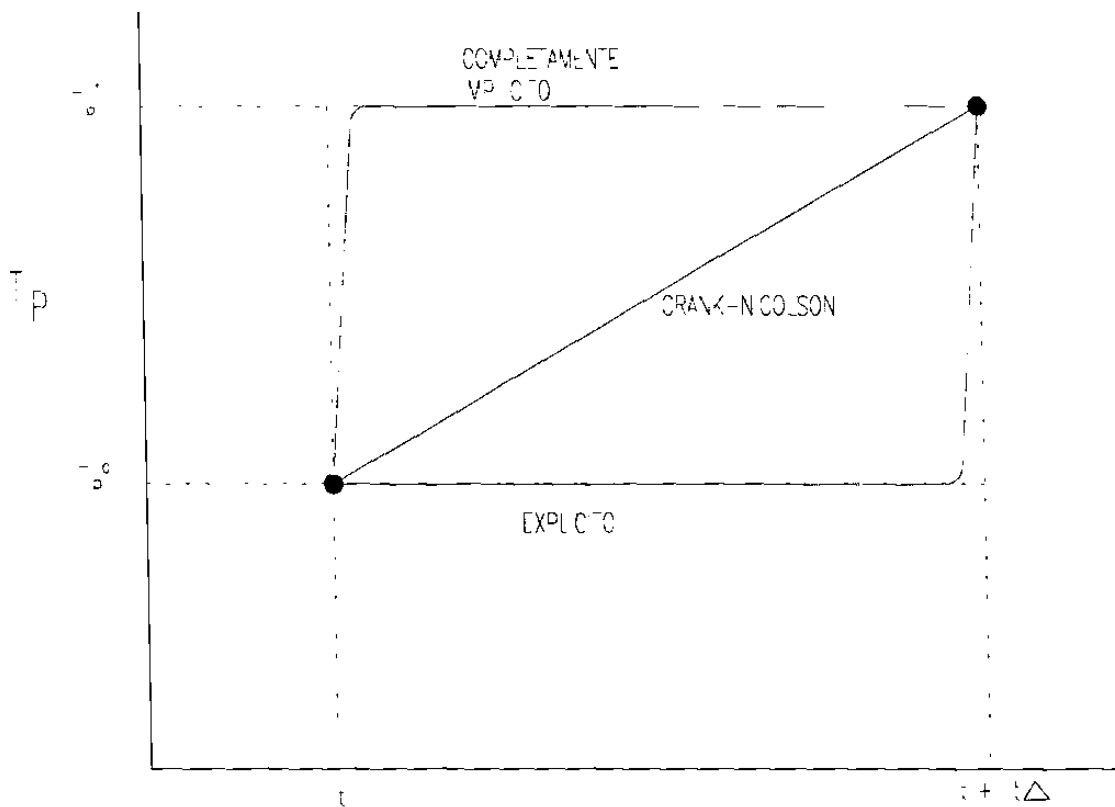


Fig. 9 Esquemas implícito, explícito y Crank-Nicolson.

En el esquema explícito se considera que la temperatura de cualquier punto permanece constante en todo el intervalo de tiempo y que súbitamente al llegar al final de ese intervalo cambia al nuevo valor de temperatura. Esto es válido sólo para incrementos muy pequeños de tiempo.

En el esquema totalmente implícito, se considera que la temperatura súbitamente cambia al nuevo valor que permanecerá constante durante todo el intervalo de tiempo, esto es válido no sólo para incrementos de tiempo pequeños, sí no también para incrementos relativamente mayores.

3.4 APLICACIÓN DEL MÉTODO NUMÉRICO.

3.4.1 DISCRETIZACIÓN Y CONDICIONES DE FRONTERA.

El proceso de fusión dentro del horno será analizado a la luz de las consideraciones anteriores para generar la ecuación de discretización en dos dimensiones.

El horno se considera como un cilindro hueco dentro del cual la fuente de energía se distribuye uniforme y concéntricamente. Por tal motivo, la discretización en dos dimensiones se hace con una sola de las mitades del horno cortado longitudinalmente como se muestra en la figura 9.

La discretización entonces consiste en colocar los nodos siguiendo una distribución cartesiana. En este caso en particular, los nodos en la dirección radial r , se encuentran espaciados entre sí un Δr de igual magnitud sobre el material MgO; en la pared de acero se utiliza un espaciamiento más pequeño. Esta diferencia se debe a que el espesor de la pared de acero es mucho más pequeño que el radio de la coraza.

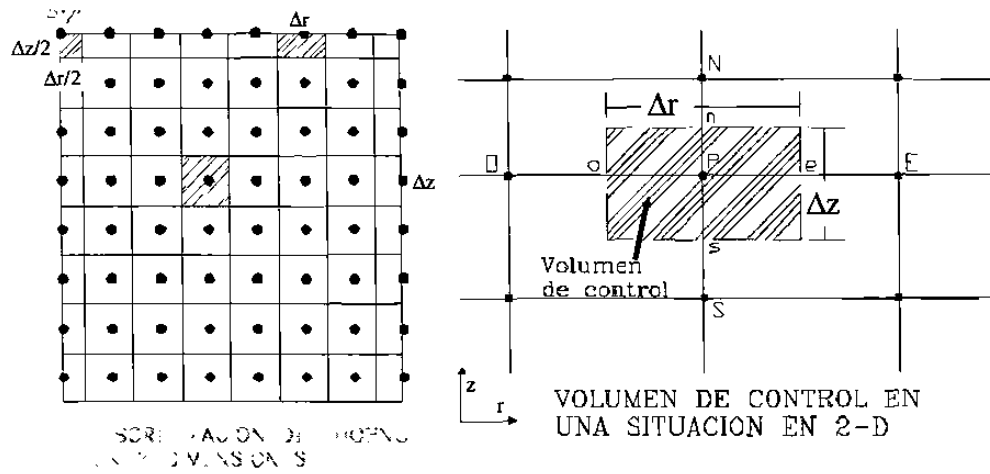


Fig. 10 Ejemplo de una discretización en 2 dimensiones.

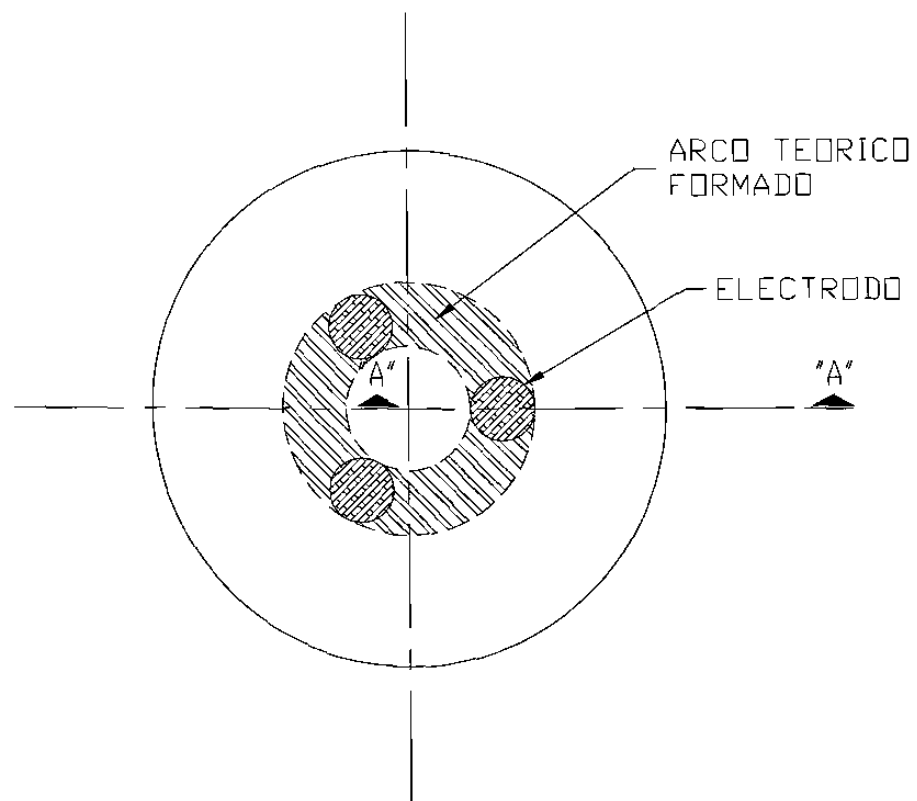


Fig. 11 Vista superior del horno de como se tomó la sección A.

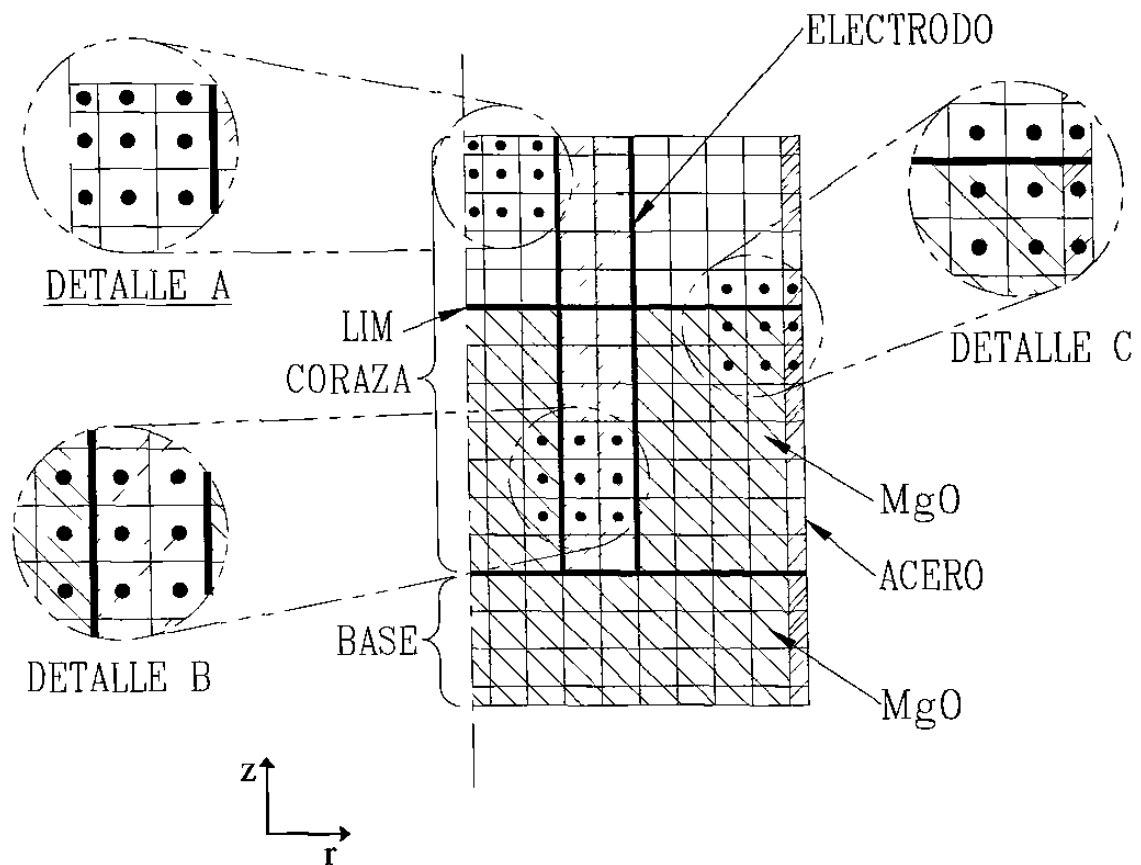


Fig. 12 Discretización de la sección típica A.

En la dirección z , se utiliza un espaciamiento uniforme en la coraza y un espaciamiento más grande y uniforme en la base, puesto que la zona de mayor interés es dentro de la coraza.

Después de colocar los nodos, las líneas que forman la malla se hacen pasar exactamente a la mitad de la distancia que separa los nodos adyacentes.

Al escoger el método de volumen de control se escogió el esquema completamente implícito, $f=1$, porque el tiempo total de simulación del proceso es del orden de 200 min. y nosotros necesitamos incrementos grandes de tiempo (2.5 min.) para avanzar más rápido. Como ya se reseñó, el enfoque completamente implícito es el único que da resultados más exactos cuando los incrementos de tiempo son grandes.

Utilizando la ecuación 3.28 en dos dimensiones, considerando la fuente de calor Q, y con f=1 se obtiene la ecuación general para generar la ecuación particular de discretización, la cual será usada para cada nodo.

$$a_p T_p = a_E T_E + a_o T_o + a_N T_N + a_s T_s + b \quad (3.30)$$

donde:

$$a_E = \frac{k_e \Delta z}{(\delta r)_e} \left[1 + \text{Ln} \left(\frac{r_e}{r_o} \right) \right],$$

$$a_o = \frac{k_o \Delta z}{(\delta r)_o} \left[1 + \text{Ln} \left(\frac{r_e}{r_o} \right) \right],$$

$$a_N = \frac{k_n \Delta r}{(\delta z)_n},$$

$$a_s = \frac{k_s \Delta r}{(\delta z)_s}$$

$$a_p^0 = \frac{\rho C \Delta r \Delta z}{\Delta t},$$

$$b = Q \Delta r \Delta z + a_p^0 T_p^0$$

$$a_p = a_E + a_o + a_N + a_s + a_p^0$$

$$\text{Donde } \Delta r = \left(\frac{(\delta r)_e}{2} + \frac{(\delta r)_o}{2} \right) \text{ y } \Delta z = \left(\frac{(\delta z)_n}{2} + \frac{(\delta z)_s}{2} \right)$$

A la vez que establecemos las condiciones de frontera vamos a analizar cómo quedaría expresada la ecuación general (3.30) aplicada a los nodos característicos de cada uno de los lados de nuestro sistema.

En el lado izquierdo (el centro del horno) tenemos aislamiento, porque los nodos contiguos a los que nosotros vamos a analizar tendrían la misma

temperatura, como si fuera un espejo, por lo que no hay conducción de calor de un lado al otro.

En la parte superior e inferior de nuestro sistema (abajo de la base) consideramos que también existe aislamiento.

En la parte derecha (la pared de acero) existe pérdida de calor por convección, donde la temperatura ambiente es constante durante el proceso, $T_{\infty} = 30 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Se estableció que nuestro sistema sería discretizado formando NR columnas y NZ filas.

Dado que el MgO se alimenta al horno de forma intermitente, se puede suponer que arriba del nivel de MgO tendremos un sistema aislado o el vacío permitiendo este último que se transmita a la pared sólo la radiación de calor proveniente de los electrodos a la pared. Esta consideración se basa en la suposición de que el efecto del aire dentro del horno al calentarse no transfiere el calor a la pared tan significativamente como lo hace la radiación, es decir, puede despreciarse. Por otro lado, el calor perdido por radiación por la parte superior también es despreciable, debido a que el área que irradia la mayor cantidad de calor es la de los electrodos y prácticamente es perpendicular a la parte superior del horno, esto significa que siendo paralela a la pared es ahí donde se concentra la mayor radiación.

Podemos empezar entonces con el análisis en cada uno de los nodos característicos.

Los nodos que representan al espacio vacío encima del nivel de MgO no intervienen en el cálculo, sino hasta que se convierten en parte del lecho de MgO y comienzan a participar en el intercambio de calor. Por lo tanto, el primer nodo que hay que analizar no es uno fijo, sí no variable, el que en determinado momento ocupa la parte superior del lecho del material, y que está en el centro

del horno, al cual designamos para su análisis como el nodo $(lim,1)$. Se indica primero el número de la fila y en segundo lugar la columna, en este caso la fila la hemos indicado como lim , que indica el límite o nivel de material, y como columna la número 1, que equivale al centro del horno. Escribimos ahora cada uno de los términos de temperatura para este nodo de la siguiente manera:

$$T_P = T_{(lim,1)} \quad T_E = T_{(lim,2)} \quad T_O = T_{(lim,0)} \quad T_S = T_{(lim-1,1)} \quad T_N = T_{(lim+1,1)}$$

Y al aplicar la condición de frontera nos queda que por simetría:

$$T_O = T_E$$

y por aislamiento:

$$T_N = T_S$$

Por lo tanto, su ecuación particular queda expresada de la siguiente manera:

$$a_{(lim,1)} T_{(lim,1)} = 2a_{(lim,2)} T_{(lim,2)} + 2a_{(lim+1,1)} T_{(lim+1,1)} \quad (3.31)$$

Ahora pasemos a los nodos en el centro del horno, que no pertenecen ni a la parte superior, ni a la inferior. Estos nodos están ubicados desde la fila (i) (o $lim+i$) hasta la fila $NZ-1$, pudiendo decir entonces que están en la fila i ésima (i) y en la columna 1. Los términos de temperatura quedan así:

$$T_P = T_{(i,1)} \quad T_E = T_{(i,2)} \quad T_O = T_{(i,0)} \quad T_S = T_{(i+1,1)} \quad T_N = T_{(i-1,1)}$$

Debido nuevamente a la simetría del sistema: $T_O = T_E$

Por lo tanto, su ecuación particular queda expresada de la siguiente manera:

$$a_{(i,1)} T_{(i,1)} = 2a_{(i,2)} T_{(i,2)} + a_{(i+1,1)} T_{(i+1,1)} + a_{(i-1,1)} T_{(i-1,1)} \quad (3.32)$$

El nodo en la posición (1,NZ) tiene la misma ecuación que el nodo (*lim*,1), (ec. 3.31), sólo que en lugar de T_N es T_S lo que aparece en la ecuación.

Los nodos superiores, (o sea los que están en el nivel que lleva el material (*lim*,*j*), donde *lim* es la fila y *j* la columna, *j* va desde 2 hasta NR-1) se calculan de la siguiente manera:

$$a_{(lim, j)} T_{(lim, j)} = a_{(lim, j+1)} T_{(lim, j+1)} + a_{(lim, j-1)} T_{(lim, j-1)} + 2a_{(lim+1, j)} T_{(lim+1, j)} \quad (3.33)$$

El siguiente análisis es en los nodos en la pared del horno. Estos nodos están ubicados desde la fila dos hasta la fila NZ-1, (llamaremos a este intervalo, *k*-ésimo), y en la columna NR. Los términos de temperatura quedan así:

$$T_P = T_{(k, NR)} \quad T_E = T_{(k, NR+1)} \quad T_O = T_{(k, NR-1)} \quad T_S = T_{(k+1, NR)} \quad T_N = T_{(k-1, NR)}$$

Aplicando la condición de frontera tenemos que: $T_E = T_\infty$

Por lo tanto, su ecuación particular queda expresada de la siguiente manera:

$$a_{(k, NR)} T_{(k, NR)} = a_{(k, NR+1)} T_{(k, NR+1)} + a_{(k, NR-1)} T_{(k, NR-1)} + a_{(k+1, NR)} T_{(k+1, NR)} + a_{(k-1, NR)} T_{(k-1, NR)} + b \quad (3.34)$$

La gran mayoría de los nodos, es decir, todos los que no forman parte de una de las fronteras se calculan directamente con la ecuación general. Estamos hablando de los nodos que se encuentran desde la fila *lim*+1 hasta NZ-1 y desde la columna 2 hasta NR-1. El número que equivale a la fila lo designamos

como i (i -ésimo) y el de la columna como j (j -ésimo). Y nos queda así la ecuación:

$$a_{(i,j)} T_{(i,j)} = a_{(i,j+1)} T_{(i,j+1)} + a_{(i,j-1)} T_{(i,j-1)} + a_{(i+1,j)} T_{(i+1,j)} + a_{(i-1,j)} T_{(i-1,j)} + b$$

(3.35)

En las ecuaciones anteriores aparece el término b , en el cual, si recordamos se encuentra implícito el calor generado por volumen, Q . Y aunque la mayoría de los puntos discretizados en el horno no generan calor, algunos de los volúmenes de control que son parte de los electrodos de grafito forman el arco eléctrico, y en éstos si se genera calor. Otros nodos en los que también interviene el término Q son aquellos que lo reciben por radiación desde los electrodos, éstos son los que forman la pared de acero y que se encuentran descubiertos, es decir aquellos que están encima del nivel de MgO a fundir (*lim*). Y para cada uno de los dos casos anteriores ya describimos en el capítulo anterior como se calculan.

El número de nodos (en este estudio se utilizó una matriz de 85x40), es el mismo número de ecuaciones que se resuelven al mismo tiempo, para tal efecto es necesario generar un programa computacional que por medio de una técnica numérica resuelva las ecuaciones.

3.5.2 GENERACIÓN DEL PROGRAMA.

Utilizando el lenguaje computacional Turbo Pascal se programó por medio de un algoritmo la manera en que hay que resolver las ecuaciones generadas por la ecuación general 3.30.

El programa final está diseñado de tal manera que el usuario sólo tenga que alimentar algunos datos. La manera estructurada del lenguaje permite programar en sub-rutinas, lo cual hace posible que éste se pueda mejorar.

En la sub-rutina principal se utiliza la técnica de iteración de Gauss-Seidel para solucionar el conjunto de ecuaciones algebraicas resultantes de la discretización.

Al realizar las iteraciones, se guardan en todo el intervalo de iteración los valores de temperatura precedentes en el tiempo, así como los valores de temperatura calculados en la primera iteración; éstos se compararán con los de la segunda iteración, y así sucesivamente hasta que todos los valores de temperatura en los nodos sean prácticamente iguales a los de la iteración anterior.

La tolerancia (TOL) es la diferencia aceptable entre el valor anterior y el nuevo valor de temperatura, y se calcula de la siguiente manera:

$$\left| \frac{T_{\text{nueva}} - T_{\text{anterior}}}{T_{\text{nueva}}} \right| < \text{tolerancia(Tol)} \quad (3.31)$$

Después de muchas corridas con el programa con diferentes valores de tolerancia desde 0.1 hasta 0.00001, llegamos a la conclusión que el mejor valor que podíamos utilizar era el de 0.001 porque se obtienen resultados estadísticamente iguales y con una rutina de iteraciones no muy lenta.

Para calcular cada uno de los valores en cada iteración se calculan las propiedades térmicas del material en ese rango de temperatura. Los cálculos se realizan en la subrutina correspondiente.

Para llegar a un nivel de discretización satisfactorio se realizaron diversas corridas con un número diferente de nodos hasta llegar a valores de temperatura sin mucha variación para cada uno de los nodos. En cada corrida el valor de la fuente de energía por unidad de volumen era el mismo y también el valor de tolerancia en el cual se debería de detener la iteración.

Al terminar las iteraciones los valores finales de temperatura se presentan en pantalla, ya sea por medio de gráficos de temperatura contra tiempo de

cualquiera de los nodos o por un termograma general de la mitad longitudinal del horno.

3.5.3 PRUEBA DEL MODELO

En el programa resultante es necesario dar los siguientes datos:

Tiempo máximo de cálculo (minutos).

Potencia eléctrica (kw).

Velocidad de ascenso de los electrodos (cm/hr).

Porosidad (%).

Índice de llenado (1-3).

Termograma o gráfica (1-2).

El tiempo máximo de cálculo se necesita para conocer hasta cuando queremos que se realice la simulación. El intervalo de cálculo seleccionado es de 2.5 min entre iteraciones. Este $\Delta t = 2.5$ min. nos brinda el mejor compromiso entre rapidez del programa y exactitud, lo cual corresponde a las características del método completamente implícito de volumen de control.

La potencia eléctrica es el valor que tiene la fuente de energía eléctrica en kw, dicho valor se obtiene directamente de los registros de consumo de energía que se llevan a cabo en la planta, mismos que van desde 2,750 a 3,250 kw por fusión. Los resultados que se obtuvieron del modelo para compararlos con los experimentales se llevaron a cabo con 3,000 kw.

La velocidad de ascenso de los electrodos (dado que depende de la corriente eléctrica), varía en la planta de 10 a 20 cm/hr. En los grupos de

prueba realizados se obtuvo un promedio de 12 cm/hr el cual se utiliza con el modelo.

La porosidad es el valor teórico ϵ que se utiliza para calcular la conductividad térmica efectiva del MgO. Los valores pueden variar de 0 a 60%. Se realizaron corridas con diferentes valores de porosidad y encontramos que 50% es el valor más representativo de lo que se tiene en el horno.

El índice de llenado es un dato que necesita el simulador para saber cuánto material se alimenta para cubrir el arco en el inicio de la fusión, y los valores utilizados son: 1= poco (3% del volumen total de MgO que se necesita para llenar el horno o sea unos 300 Kg.); 2= regular (6% o sea unos 600 Kg.); y 3= mucho (10% o sea unos 1000 Kg.). Se utilizó un índice de 2, pues es el más representativo de lo que pasa en la planta al alimentar el material.

Finalmente, el programa está preparado para mostrarnos los resultados mediante un termograma o con una gráfica de temperatura contra tiempo.

CAPITULO 4

DESARROLLO EXPERIMENTAL

4.1 INTRODUCCIÓN.

En este capítulo se describe la manera en que se seleccionó la técnica de medición de temperaturas en la coraza del horno y cómo se condujeron los experimentos realizados en la planta y con el simulador.

4.2 SELECCIÓN DE LA TÉCNICA TERMOMÉTRICA.

Después de analizar las opciones posibles [9] para medir temperatura, se escogió la técnica que consideramos más adecuada a nuestro proceso.

Como sabemos, dentro del horno las temperaturas son muy elevadas: valores cercanos a los de la fusión de MgO (2800 °C).

Dado que se alimenta el material dentro del horno de forma intermitente, es difícil sensar la temperatura del material durante su fusión. Lo que se puede medir fácilmente es la temperatura en el exterior de la

pared del horno, medición que nos puede servir para validar los resultados arrojados por el simulador.

Para medir la temperatura en la pared del horno en un rango que va desde temperatura ambiente hasta el punto de fusión del acero (cerca de 1550 °C), se puede usar la técnica de contacto, o de no contacto. Esta última conocida también como pirometría, se utiliza después de los 500 °C siendo necesario la calibración por medio de termopares. La oxidación que pueda tener la pared del horno afecta en la medición de temperatura. Para nuestra aplicación la técnica de contacto es preferible, usando un termopar tipo R (300 a 1480 °C).

El termopar tipo R (Pt[+] vs. Pt, 13% Rh[-]), fabricado con platino y rodio se protege de la corrosión con una cubierta de material cerámico, ya que a elevadas temperaturas son fácilmente atacados por las sustancias corrosivas en la atmósfera.

La longitud y el espesor del termopar están determinados por el material utilizado para proteger los elementos del termopar.

En el caso particular del horno de fusión de MgO, los termopares tienen una longitud de 30 cm. Se hace una perforación en la coraza del horno y se prepara el termopar de tal manera que se encuentre en contacto con el material unos 5 cm. adentro del horno y sujeto por fuera de la coraza de tal forma que no se mueva durante la medición.

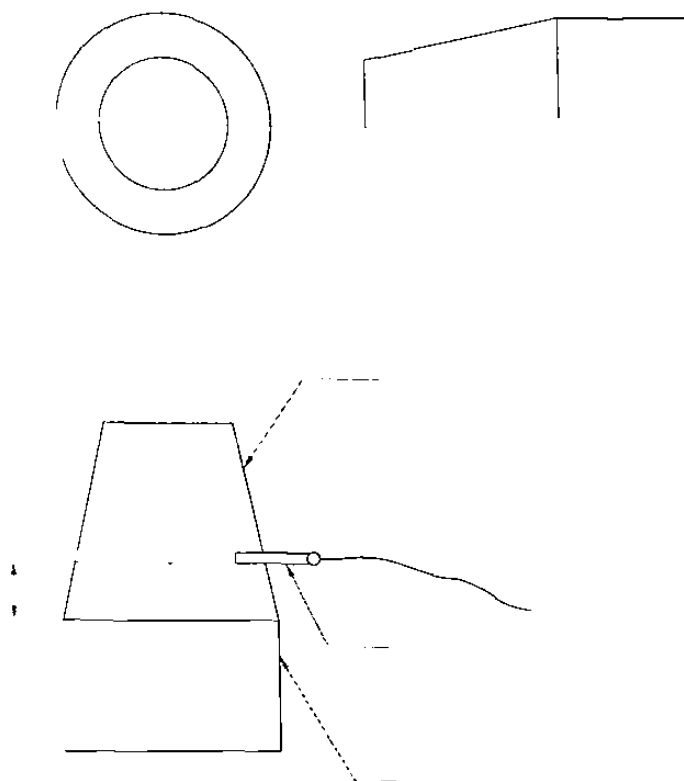


Fig. 13 Esquema típico de como se colocó cada termopar por fase.

4.3 EXPERIMENTACIÓN EN LA PLANTA.

Al hacer un muestreo con las corazas utilizadas para fundir MgO , se encontró que la sección de pared de las corazas en la dirección radial de cada una de las fases son las que muestran más puntos calientes a una altura aproximada de 40 cms. Por lo que 3 termopares se colocaron a esa altura en direcciones diferentes.

El cable utilizado por el termopar de 3 metros de longitud se cubrió con fibra cerámica para protegerlo de la radiación cerca de la coraza, la cual

podría afectar las mediciones reportadas por el termopar. Este último se conectó a una pantalla de estado sólido donde se observaba como variaba la temperatura. Cada prueba se realizó por un período de tiempo de 190 minutos, tomando lecturas de temperatura cada 5. El lugar de colocación de los termopares fue a 40 cm de la base para todas las pruebas. En cada uno de los grupos de pruebas se orientó el termopar a un ángulo de 0° en dirección radial de cada uno de los electrodos. Esto quiere decir que había 120° entre los termopares.

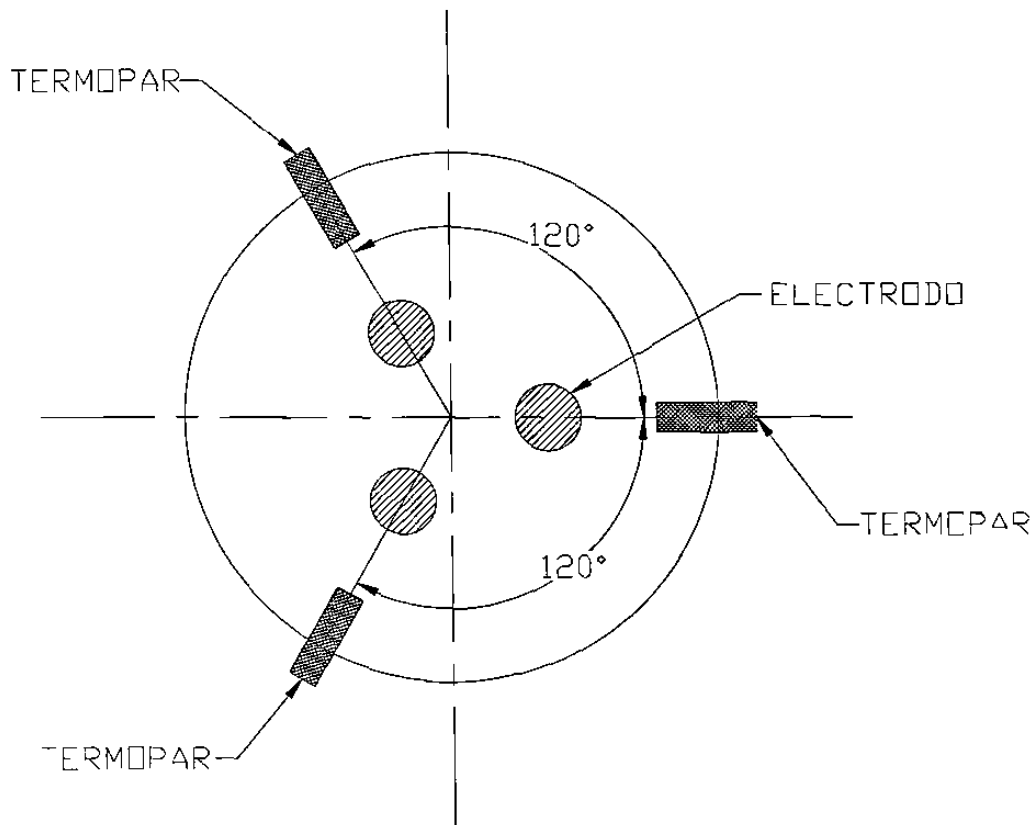


Fig. 14 Forma esquemática en que se colocaron los termopares, uno a la vez.

CAPITULO 5

RESULTADOS Y DISCUSION

5.1 INTRODUCCIÓN.

En este capítulo se analizan los resultados experimentales lo mismo que las predicciones del programa.

Se muestran resultados de simulaciones con diferentes datos alimentados.

Las predicciones del modelo concuerdan con lo medido en los experimentos en lo que respecta a la transferencia de calor por conducción y hasta un 13% de diferencia con respecto a la radiación.

5.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS EXPERIMENTALES.

Con los valores medidos de temperatura de la coraza contra tiempo se obtienen gráficas para cada punto. Se muestran sólo tres de ellas que son representativas de los resultados.

Las condiciones de operación durante la medición de la temperatura corresponden a las de una operación normal de fusión en la planta. Dichas condiciones son las siguientes:

Potencia eléctrica	3000 kw.
Velocidad de ascenso de los electrodos	12 cm/hr
Alimentación de material (llenado)	aprox. 5% del volumen total del horno cada 10 min.
Posición de los termopares	altura: 40 cm.
	1 0°
	2 120°
	3 240°

Antes de presentar las gráficas de temperatura hay que cabe mencionar que para cada uno de los tres puntos donde se midió este parámetro se realizaron varias mediciones, mostrándose aquí sólo la gráfica característica de cada punto. Dependiendo del punto en cuestión se hará referencia a las pruebas 1,2 ó 3.

En las figuras 15,16 y 17 se observa la elevación de la temperatura en los primeros 10 minutos después del arranque de la fusión, para inmediatamente después caer a valores de temperatura alrededor de la mitad del pico máximo alcanzado, permaneciendo alrededor de ese valor e incrementándose muy lentamente después de los 160 min.

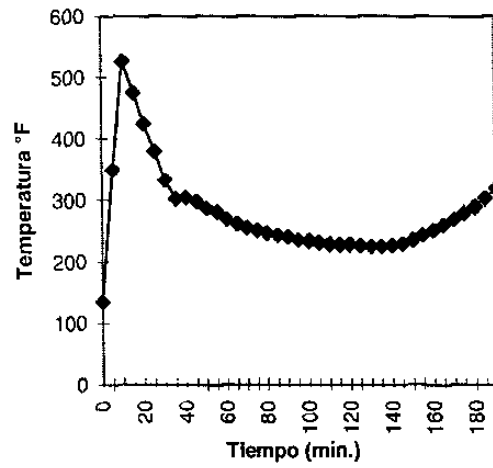


Fig. 15 Gráfica de los resultados de la prueba 1.

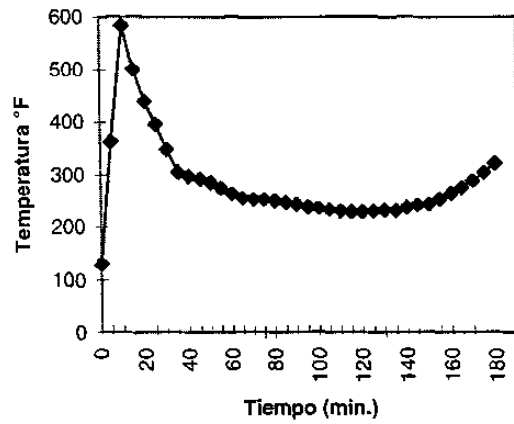


Fig. 16 Gráfica de los resultados de la prueba 2.

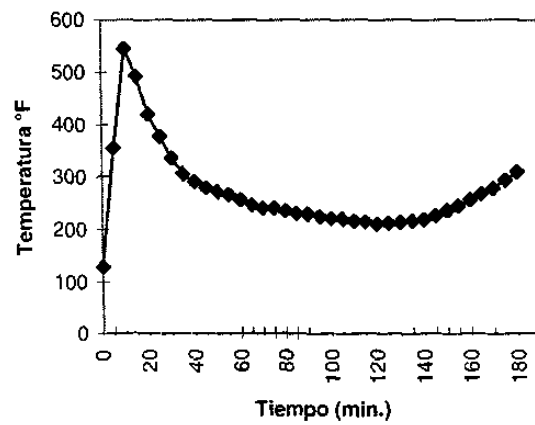


Fig. 17 Gráfica de los resultados de la prueba 3.

Al inicio de la fusión, cuando se forma el arco eléctrico entre los electrodos, no existe material que los cubra por lo que se alcanzan temperaturas muy elevadas, del orden de los 15000 °C [8], calentándose principalmente la parte inferior por radiación debido a que el arco se forma en esta parte, afectando inmediatamente a las áreas más cercanas. Por tal razón, podemos decir que el pico máximo de temperatura registrado a los 10 minutos de iniciada la fusión, se debe exclusivamente a la radiación proveniente del arco eléctrico que calienta toda la parte interior de la coraza. Después decrece sensiblemente el valor de la temperatura debido a que el arco se cubre por la materia prima alimentada, cubriéndose la fuente de radiación, iniciando así el calentamiento por conducción.

La elevación de temperatura en los minutos finales de la fusión se debe precisamente a la conducción de calor a través del MgO desde el punto en que se genera y hasta la pared. Este calor tardó en llegar debido a las propiedades aislantes del material a fundir.

5.3 SIMULACIÓN DEL PROCESO

5.3.1 GRÁFICAS DE TEMPERATURA VS. TIEMPO

Chequemos ahora de una manera extensa el modelo generado.

Adelantamos que el modelo simuló muy bien las condiciones de operación de la planta.

El análisis realizado se enfocó en las tres variables del proceso que sabemos lo afectan directamente, a saber, velocidad de ascenso de los electrodos, potencia eléctrica y la cantidad de material alimentado. Además, incluimos el factor de porosidad del material ϵ con el cual en el programa se toma en cuenta el lecho poroso.

A continuación se muestra la matriz de datos con las que se realizaron los experimentos en la computadora:

Tabla 4. Matriz de datos utilizados en cada una de las simulaciones.

Simulación	Pot. (Kw.)	Vel. (cm/hr)	Porosidad (%)	Llenado (1-3)
1	3000	12	30	1
2	3000	12	30	2
3	3000	12	30	3
4	3000	15	30	3
5	3000	20	30	3
6	3000	12	50	1
7	3000	12	50	2
8	3000	12	50	3
9	3250	12	30	2
10	3500	12	30	2

Como podemos observar en la matriz anterior hemos tomado dos o tres niveles para cada una de las variables. La variación que tiene cada una de ellas está muy relacionada con las probables variaciones que se pueden dar en la planta. Por ejemplo, observamos qué pasa al variar la velocidad de ascenso de los electrodos de 12 a 20 cm/hr. O la cantidad de material alimentado dentro del horno (llenado) la cual varía de 1 a 3 (ver punto 3.5.3) entre otras. Y vemos que la mayoría cambia del valor utilizado hacia un solo lado, porque nos interesó conocer qué pasaría en condiciones con mayor energía irradiada a la pared, no con menor.

La simulación número 7 es la que tiene como datos los utilizados en la planta cuando se realizaron las pruebas experimentales, pero antes de

comentar algo sobre esta simulación hagamos el análisis en el orden que aparecen en la tabla.

A continuación un análisis de cada una de las gráficas obtenidas según la simulación.

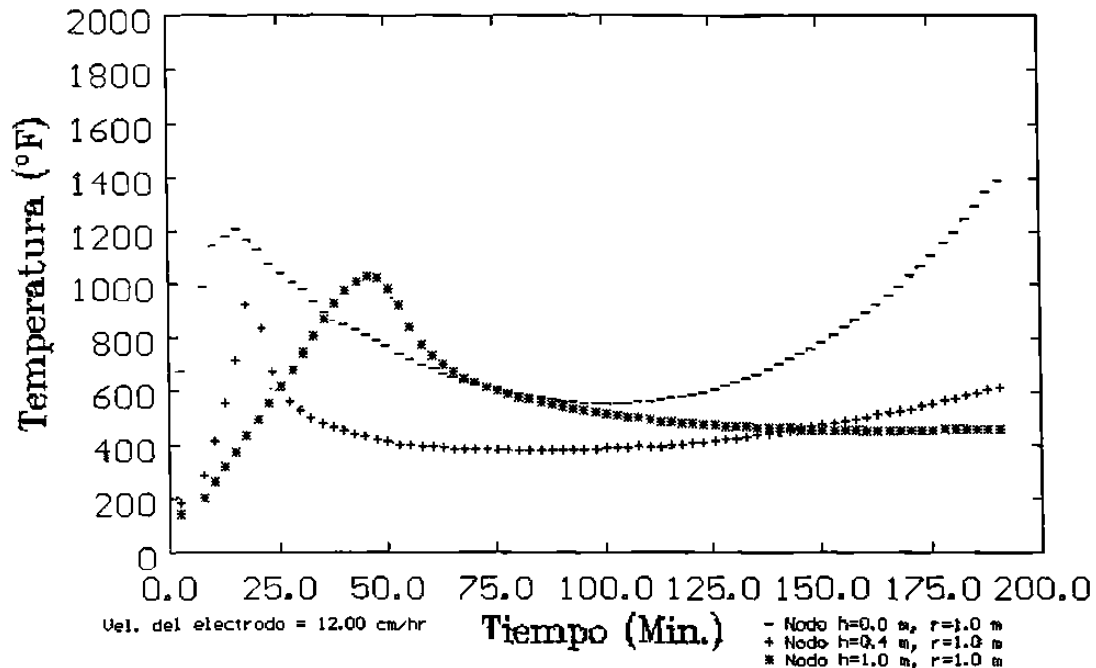


Fig. 18 Gráfica obtenida al utilizar los datos para la simulación 1.

En todas las gráficas vamos a encontrar tres curvas correspondientes a tres puntos sobre la coraza del horno. Llamaremos punto 1 al que está a 0.0 m. de la base (-), punto 2 al que está a 0.4 m. de la base (+) y punto 3 el que está a 1.0 m. de la base (*).

En esta simulación utilizamos la potencia y la velocidad de ascenso utilizadas en la planta, 3000 Kw y 12 cm/hr respectivamente. La porosidad del material menor a la utilizada para obtener las condiciones reales, es decir se

considera al material más continuo o más conductor, su valor es de 30% y la cantidad de material alimentada menor a la real, llenado igual a 1, por lo tanto hay menos material para cubrir los electrodos.

En esta primera simulación vemos cómo aumenta la temperatura para el punto 1 (-) desde temperatura ambiente hasta 1200 °F en 20 minutos, después decrece por alrededor de 80 minutos hasta llegar a casi 600 °F, más luego vuelve a aumentar su temperatura en una razón menor que al inicio de la fusión pero sobrepasando los 1300°F.

Al inicio de la simulación se observa el efecto de no tener cubierto el arco con suficiente material, de manera que la pared de la coraza recibe la radiación directa proveniente del arco, elevando su temperatura. Es cierto que esto no sucede por los 20 minutos en que permanece elevándose su valor, pero el calor recibido por radiación en los nodos inmediatos superiores de la coraza es conducido hacia el punto 1, lo que da un efecto de inercia térmica, hasta que también estos puntos son protegidos por el material recién alimentado. Lo que provoca que al no haber una fuente directa de calor la temperatura de estos puntos disminuya sustancialmente.

Por otra parte, observamos que en el resto de la gráfica, al decrecer su temperatura no lo hace de una manera brusca, esto se debe a que este punto en particular recibe calor por conducción del MgO que se encuentra dentro de la base y del recién alimentado material, además del que se transfiere a través de la coraza. El aumento de temperatura que se da después del minuto 100 es resultado de la conducción de calor que se da a través del lecho poroso desde la fuente hasta la coraza, recordando que se utilizó para esta simulación un valor de 30% de porosidad, lo que da por consiguiente un material más conductor al que se utilizó durante las pruebas.

Continuamos ahora con el análisis del punto 2 (+). Podemos observar que su comportamiento es semejante al del punto 1 en los primeros 20 minutos, desfasado unos 5 minutos que es el tiempo que tarda en conducirse el calor a través de los electrodos hacia regiones superiores, calentando estas áreas no cubiertas por el MgO que irradian su calor a la coraza. Otra diferencia entre este punto y el anterior es la temperatura máxima alcanzada, la cual es menor. Esto se debe a que este punto recibe la radiación de áreas en el electrodo con temperaturas menores a las que se encuentran en el arco eléctrico, siendo probable también que el arco haya desaparecido por lo que ahora es el "arco sumergido" el que está presente y muy probablemente con temperaturas menores a las del inicio de la fusión. La caída de su temperatura después del pico máximo es muy brusca, esto se debe quizá a un gradiente muy grande entre este punto y los adyacentes, entre ellos el MgO recién alimentado a temperatura ambiente que lo protege de la radiación, este material no es calentado de una manera rápida por el MgO del lecho poroso debido al volumen cada vez mayor de material nuevo. Al final de la simulación tiene un ligero incremento de temperatura.

En el punto número 3 (*), tenemos un comportamiento muy parecido al 2, las diferencias radican en que la elevación y disminución de su temperatura se dan con una razón de cambio mas lenta, esto puede deberse a que su calentamiento es gradual (al igual que el de los nodos adyacentes), y su disipación de calor es también lenta por el gradiente de temperatura menor que existe entre dichos nodos. Otra diferencia encontrada es que alcanza una temperatura mayor que la del punto 2, pues el MgO no cubre lo suficiente al arco eléctrico.

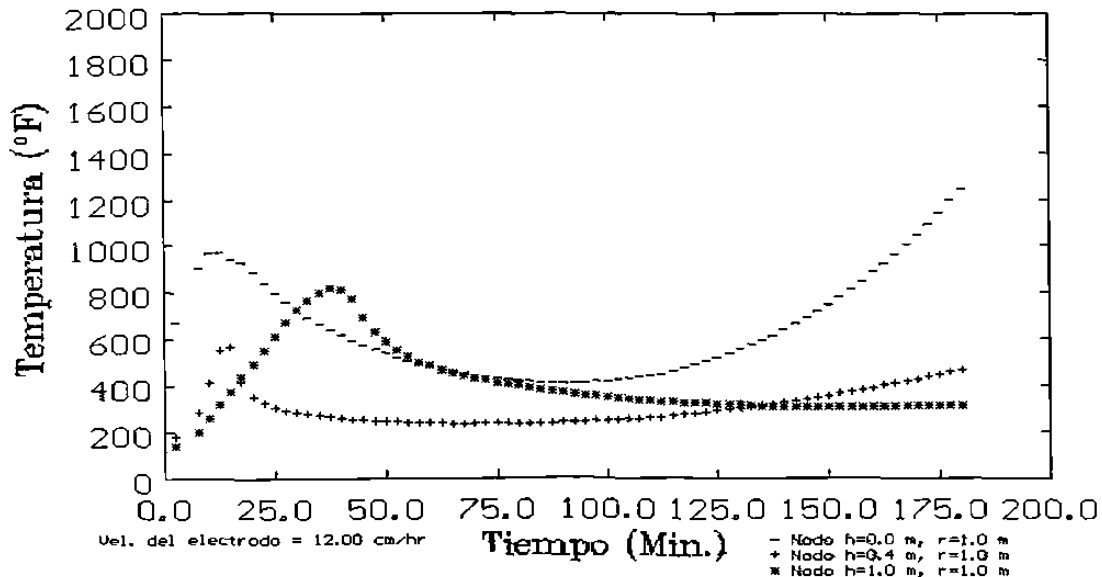


Fig. 19 Gráfica obtenida al utilizar los datos para la simulación 2.

En la segunda simulación se utilizó el segundo valor de alimentación de material (2), el normalmente utilizado en la planta. Los otros datos son los mismos que los de la simulación 1. El efecto directo que tiene esta variable de llenado se observa rápidamente. Las temperaturas máximas alcanzadas al inicio de la fusión para los puntos 1 y 2 disminuyen en alrededor 200 °F respectivamente. Esto se debe a que el arco es cubierto con más material lo que evita que irradie calor a la coraza por más tiempo. La disminución de su temperatura también llega a valores menores pero muy cercanos a los anteriores.

El comportamiento de los tres puntos después del minuto 50 es equiparable al de la simulación anterior, pues es directamente influenciado por la conducción de calor a través del MgO, y la variable que tiene una influencia directa en esto es la porosidad, que no cambió.

Por último, el comportamiento general del punto 3 es casi idéntico al de la simulación 1, salvo que la temperatura alcanzada es menor. Esto se debe a que el arco eléctrico es cubierto con más material y no irradia por mas tiempo la coraza.

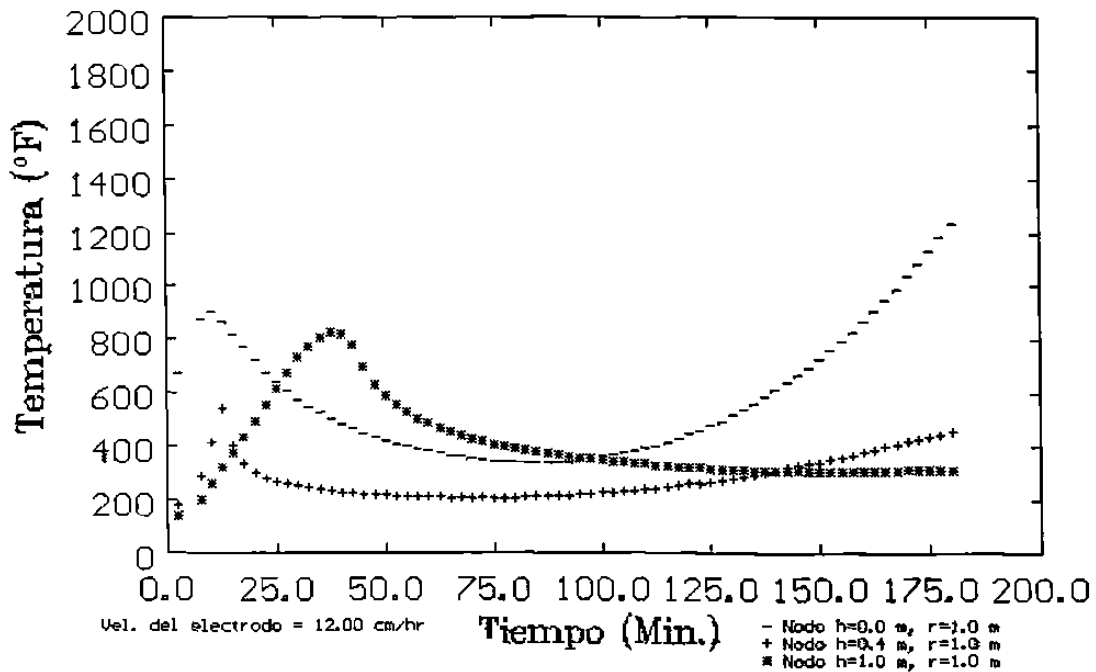


Fig. 20 Gráfica obtenida al utilizar los datos para la simulación 3.

Aquí tenemos aplicado el tercer valor de la variable, llenado. Más cantidad de MgO alimentado de lo que normalmente se utiliza en la planta.

Comparemos estos resultados con los de la simulación 2. El efecto de tener mas material nuevamente se percibe rápido, la temperatura máxima alcanzada al inicio para los puntos 1 y 2 disminuyó unos 50 °F, respectivamente.

En general es el mismo comportamiento de los tres puntos contra los que se obtuvieron en la simulación anterior.

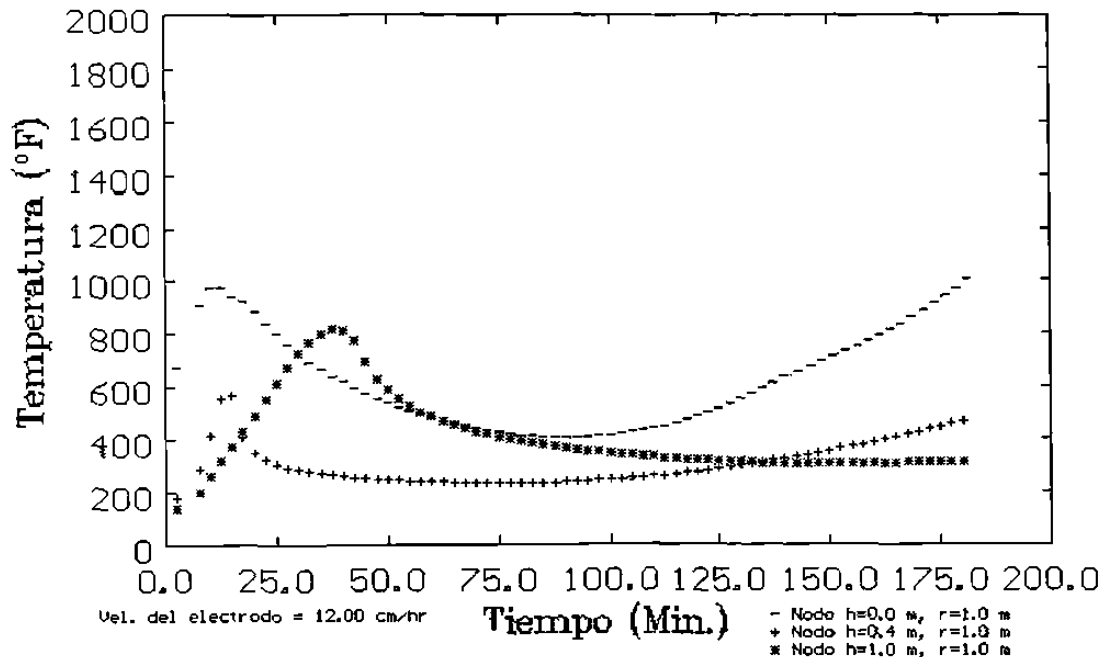


Fig. 21 Gráfica obtenida al utilizar los datos para la simulación 4.

En esta simulación tomamos de referencia todos los datos utilizados para la simulación anterior, excepto que ahora se aumenta la velocidad de ascenso de los electrodos a 15 cm/hr. El comportamiento obtenido es prácticamente el mismo que en la simulación anterior. Al inicio el punto 1 se calienta más, esto se puede deber a que como los electrodos suben más rápido pueden irradiar su calor desde puntos con mayor temperatura a la coraza. Para los últimos minutos de la gráfica para el mismo punto vemos un incremento menor, esto se debe a que la fuente de calor se aleja un poco más rápido de la base provocando que se caliente en menor proporción el material que la rodea y por lo tanto es también menor el calor que llega a la pared por conducción.

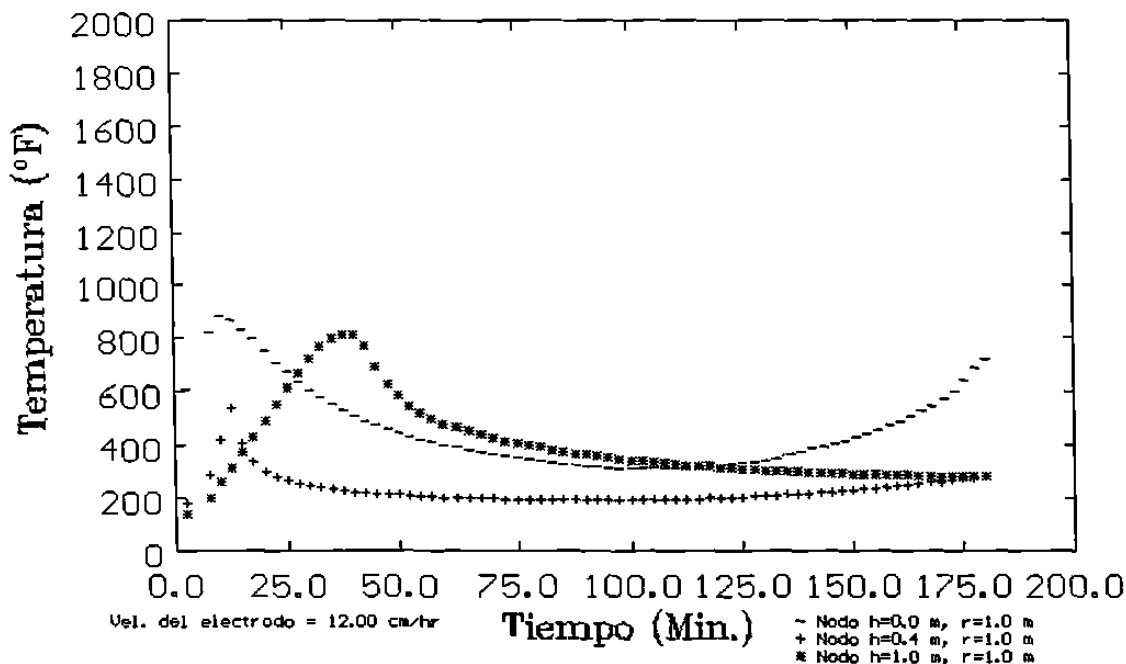


Fig. 22 Gráfica obtenida al utilizar los datos para la simulación 5.

Volvemos a variar la velocidad de ascenso de los electrodos, ahora es de 20 cm/hr, los demás valores son los mismos que los de las 2 simulaciones anteriores. Los resultados obtenidos con estos datos son ligeramente menores a los de la simulación anterior para el punto 1 y esto se puede deber a que la fuente de calor se aleja más rápido de la base sin lograr calentar la coraza tanto. Para los otros dos puntos (2 y 3), el comportamiento es el mismo, es probable que las regiones calientes de los electrodos que irradian la coraza tengan la misma temperatura que en la simulación anterior.

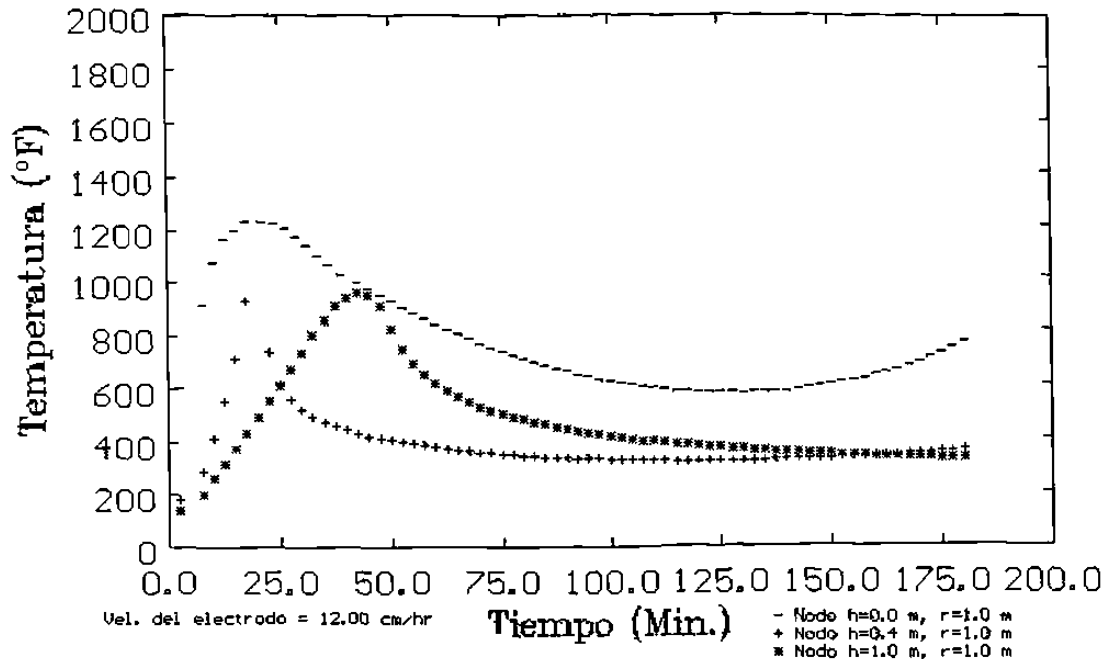


Fig. 23 Gráfica obtenida al utilizar los datos para la simulación 6.

Pasamos ahora a la variación de la porosidad de 30% a 50% partiendo de los mismos datos utilizados para la simulación 1. Los resultados mostrados en los primeros 100 minutos son prácticamente los mismos en la simulación 1 y la 6. Después del minuto 100 la temperatura alcanzada en esta gráfica es menor, principalmente para el punto 1, esto se debe a que, como ya sabemos, en esta parte del proceso el intercambio de calor es principalmente influenciado por la conducción en el MgO y la coraza, y es precisamente la variable de conducción la que se varía al cambiar la porosidad del material. Para el punto 2 y el 3, vemos que permanecen en una temperatura constante ya sin volver a repuntar, como sucede en la simulación 1 para el punto 2.

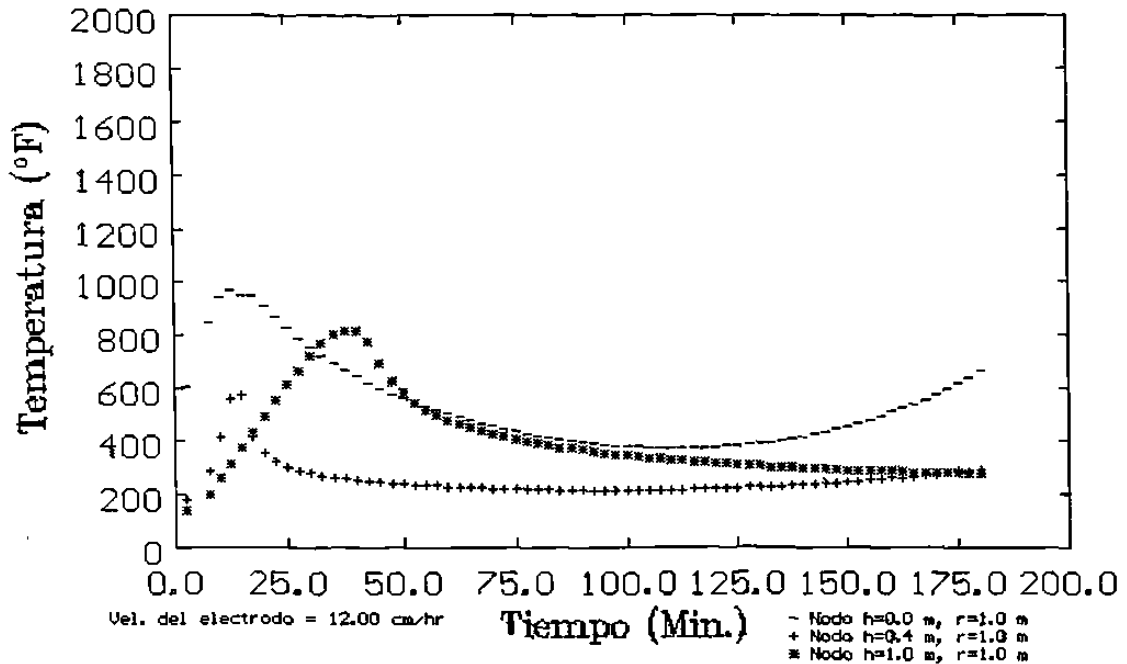


Fig. 24 Gráfica obtenida al utilizar los datos para la simulación 7.

En esta simulación continuamos con la variable de porosidad de 50% y con la variable de llenado de 2. Esto significa que la podemos comparar con la simulación 2, con la única diferencia en la variable porosidad.

Esta es la simulación que describe que es lo que pasa en la planta, pues son exactamente los mismos valores. En el siguiente punto de este capítulo vamos a comparar los resultados experimentales y los simulados.

Si comparamos estos resultados contra los de la simulación 2 vemos que nuevamente como en la gráfica anterior el comportamiento es lo mismo en lo que se refiere a la influencia de la radiación en los primeros 100 minutos, y en los restantes observamos como decrece su valor influenciados por el cambio en la conducción de calor del MgO.

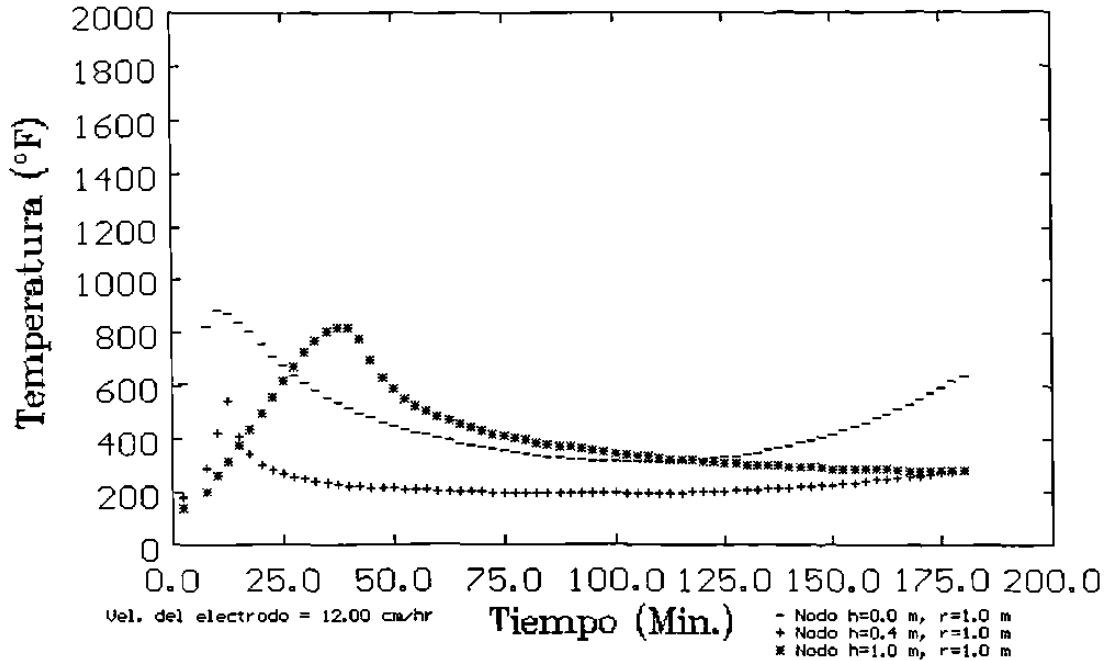


Fig. 25 Gráfica obtenida al utilizar los datos para la simulación 8.

Podemos decir lo mismo que acabamos de decir para las dos gráficas anteriores. Tenemos ahora el mismo caso que para la simulación 3. La diferencia, la porosidad de 50%. Aquí volvemos a observar el efecto generado al considerar que el lecho poroso de MgO es menos continuo, menos conductor.

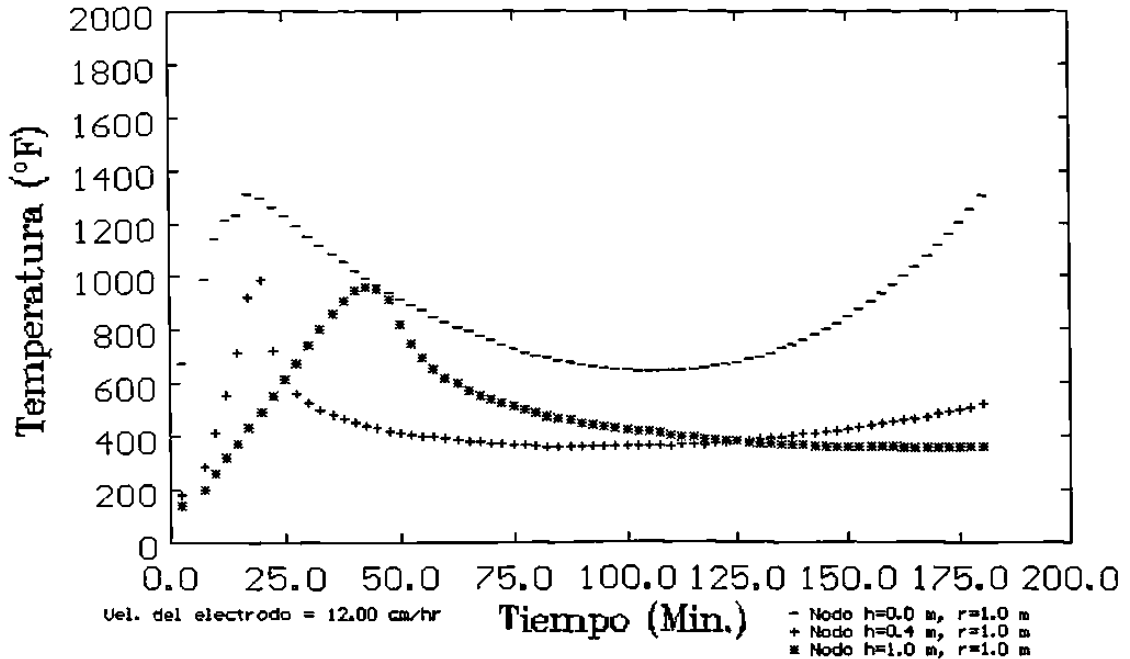


Fig. 26 Gráfica obtenida al utilizar los datos para la simulación 9.

Para obtener esta gráfica partimos de la simulación 2, cambiando la potencia eléctrica, que ahora es de 3250 Kw. Observamos cómo de manera general se registran temperaturas mayores en todos los puntos. Es prácticamente el mismo comportamiento que se obtuvo con la simulación 1, en la que se utilizó poco material de llenado (1), aquí utilizamos el valor de 2. De cualquier manera para el punto 1 se recibe una mayor cantidad de calor elevándole su temperatura unos 100 °F más.

En resumen, podemos decir que el efecto de tener mayor potencia eléctrica aplicada, es equiparable a no tener suficiente material para cubrir el arco (simulación 1). La diferencia más importante es de que el punto 1 recibe un mayor calentamiento.

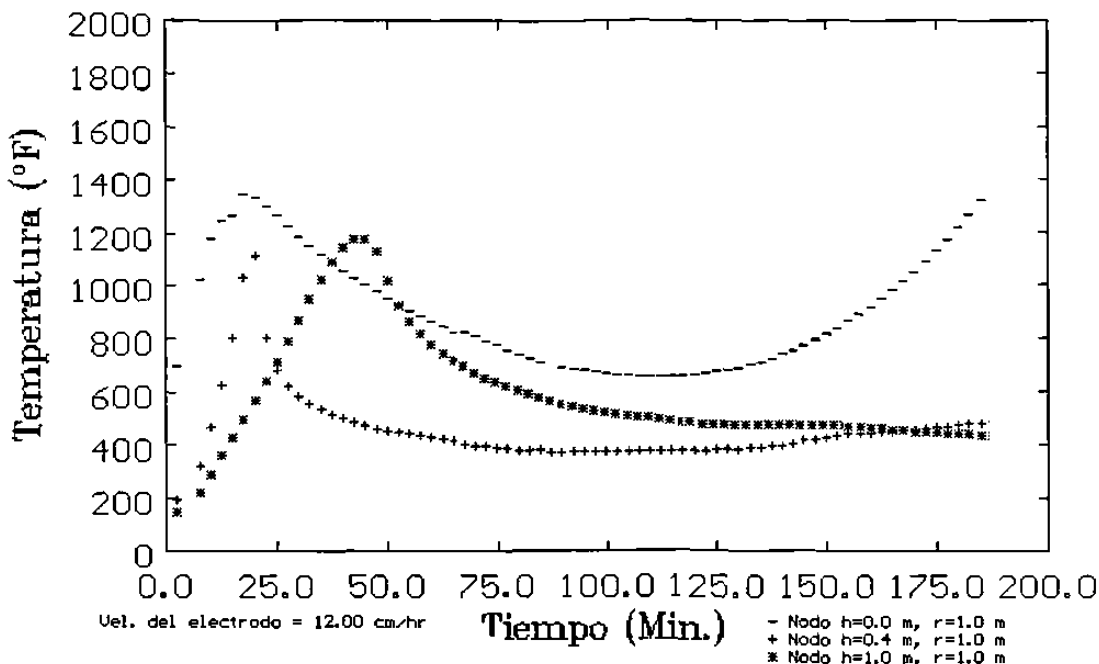


Fig. 27 Gráfica obtenida al utilizar los datos para la simulación 10.

Para esta simulación partimos de los datos en la simulación anterior, pero ahora la potencia eléctrica es de 3500 Kw. Se observa cómo los puntos 1 se comportan casi igual. Los otros dos puntos en esta simulación alcanzan mayor temperatura, lo que está directamente relacionado a que hay mayor calor irradiando la coraza en el mismo tiempo.

Ahora ya que se han mostrado y analizado cada una de las diez simulaciones con las que vimos de qué manera se influencia el proceso al variar cada variable, podemos concluir que las variables que tienen mayor efecto en la variación de la temperatura durante todo el proceso son, la cantidad de material alimentado y la potencia eléctrica. La variable que tiene efecto sólo en los últimos 3/4 del tiempo de simulación (que equivale al tiempo en el que es la conducción de calor la que afecta la elevación de temperatura en la coraza) es la porosidad del material. La única variable que no tiene un

efecto importante en la elevación de temperatura en la coraza, es la velocidad de ascenso de los electrodos.

Pasemos ahora a comparar los resultados experimentales contra los simulados para la misma condición en la planta, es decir los de la simulación 7.

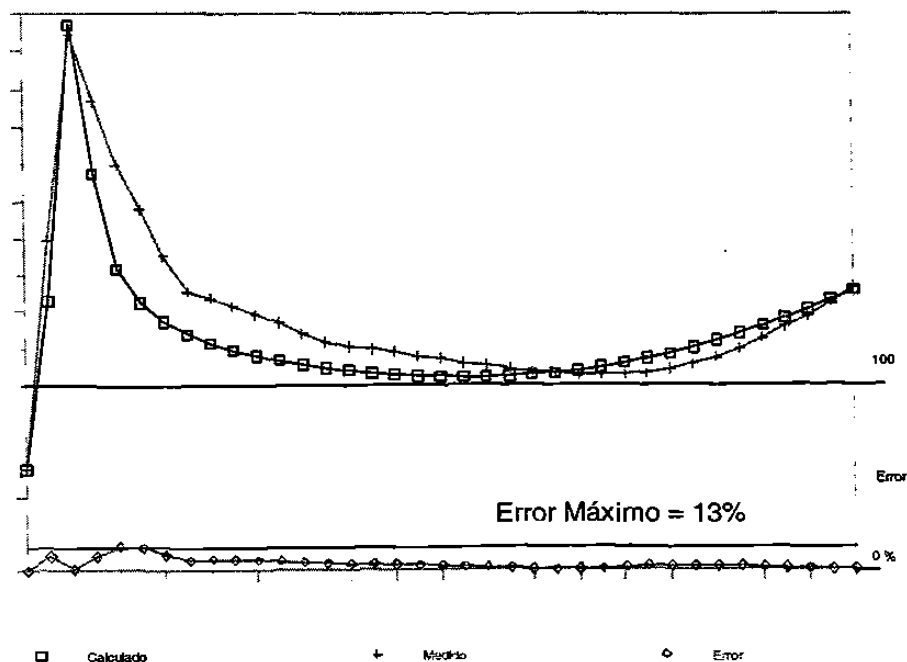


Fig. 28 Comparación entre los resultados medidos y calculados.

En esta figura observamos que entre la temperatura medida (+) y la calculada o simulada (□) el error máximo encontrado es de 13 % y se encuentra entre los minutos 20 y 30, que es cuando la temperatura disminuye después de haber llegado al punto máximo por radiación, esto se puede deber a que en la simulación se calcula que el calor es disipado mas rápidamente de lo que sucede en la realidad, esto se puede mejorar afinando el valor de transferencia de calor del aire sobre la parte exterior de la coraza y agregar uno para la perte interior que en la realidad sí existe, pero en el modelo no se considera.

5.3.2 TERMOGRAMAS

A continuación se muestra un conjunto de termogramas, llamados así debido a que cada color representa un rango de temperatura.

En la figura 28 se observa la parte izquierda de las imágenes, es decir lo que es precisamente el termograma. Esta figura representa la mitad longitudinal del horno esquematizado por el rectángulo. La línea del extremo izquierdo es el centro del horno, la línea inferior la base, la línea del extremo derecho es la pared de acero o coraza.

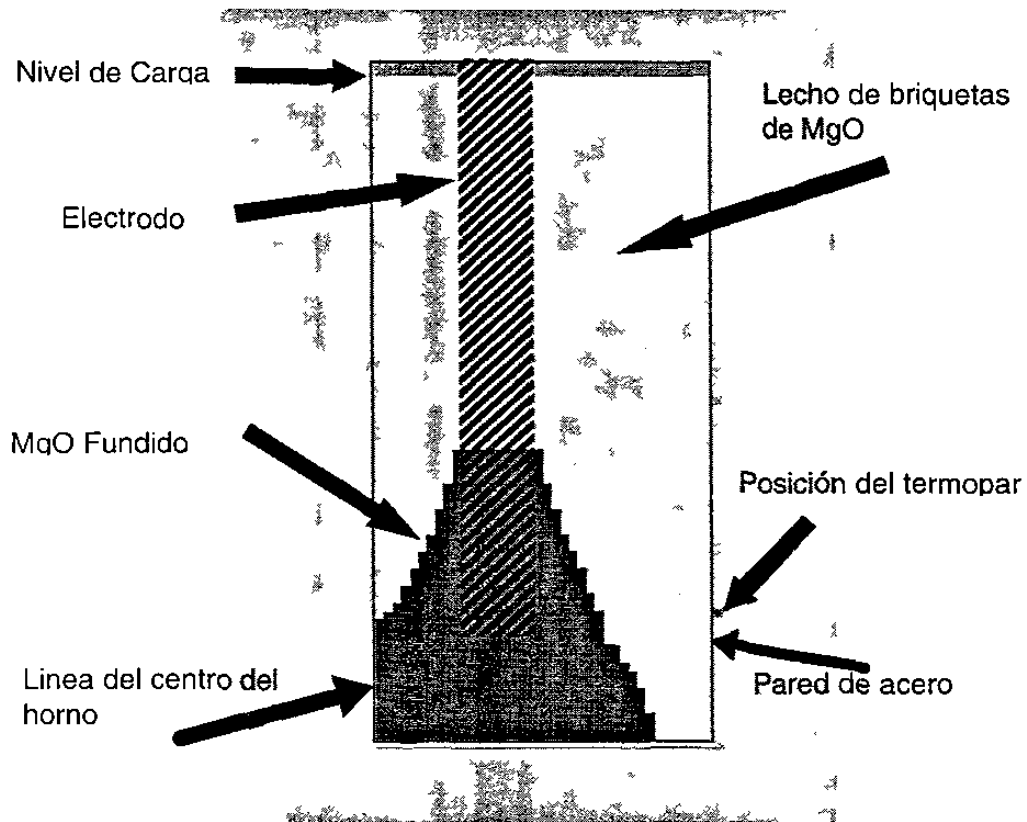


Fig 29 Explicación de lo que representa cada parte vista en un termograma.

El plano de corte se hace pasar por el centro de uno de los electrodos, el cual se observa en la figura como el rectángulo hachurado a 30 cm del centro

del horno (representado por la línea que sirve de límite a la izquierda de la figura).

Por lo tanto, por medio del termograma podemos conocer rápidamente a un instante determinado de tiempo la temperatura que existe dentro del horno en un punto de interés.

El conjunto de imágenes fueron grabadas cada 2.5 min. para cada una de las simulaciones, aquí mostraremos sólo algunas pertenecientes a la simulación 7.

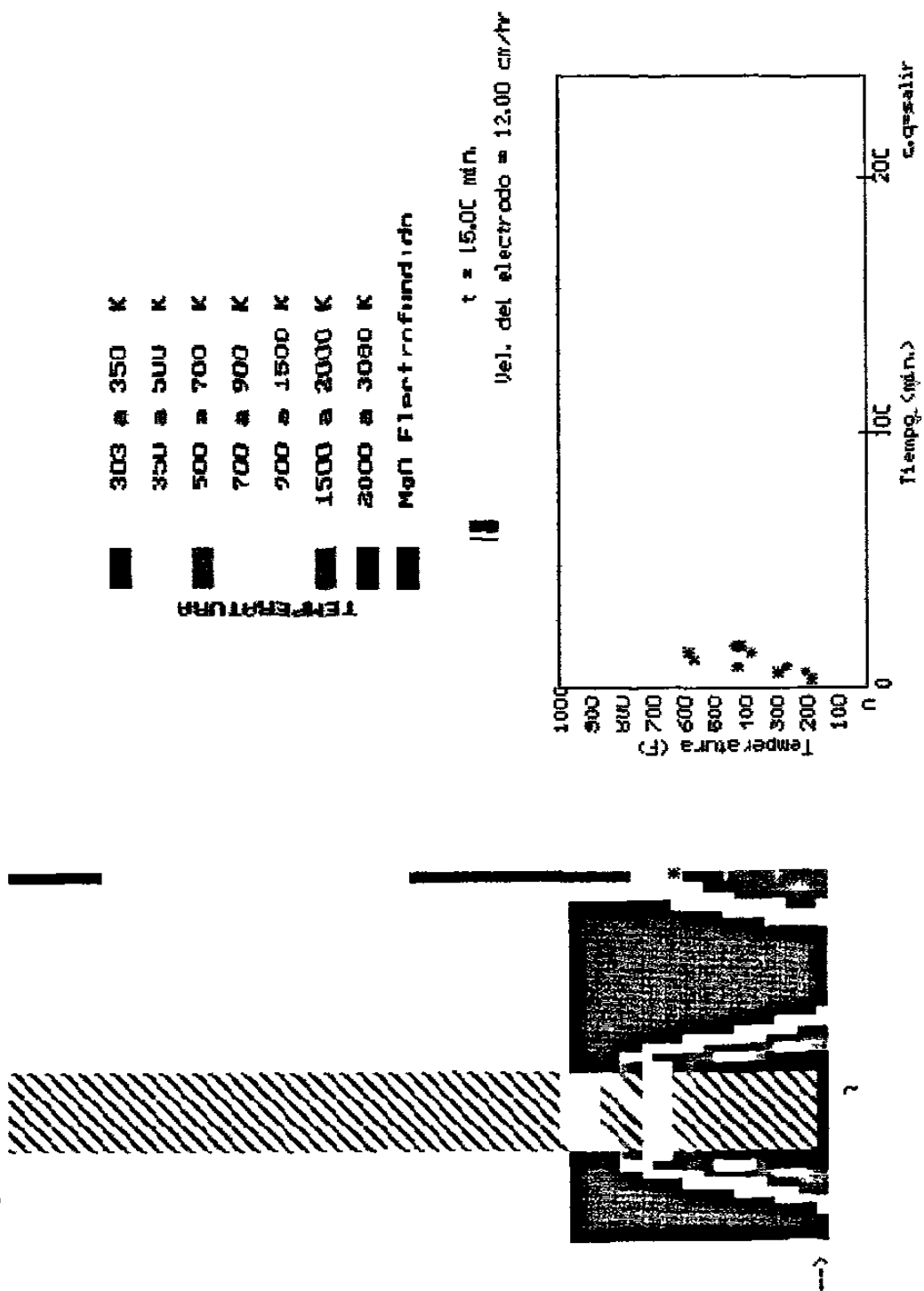


Fig. 29 Termograma grabado al simular 15 minutos.

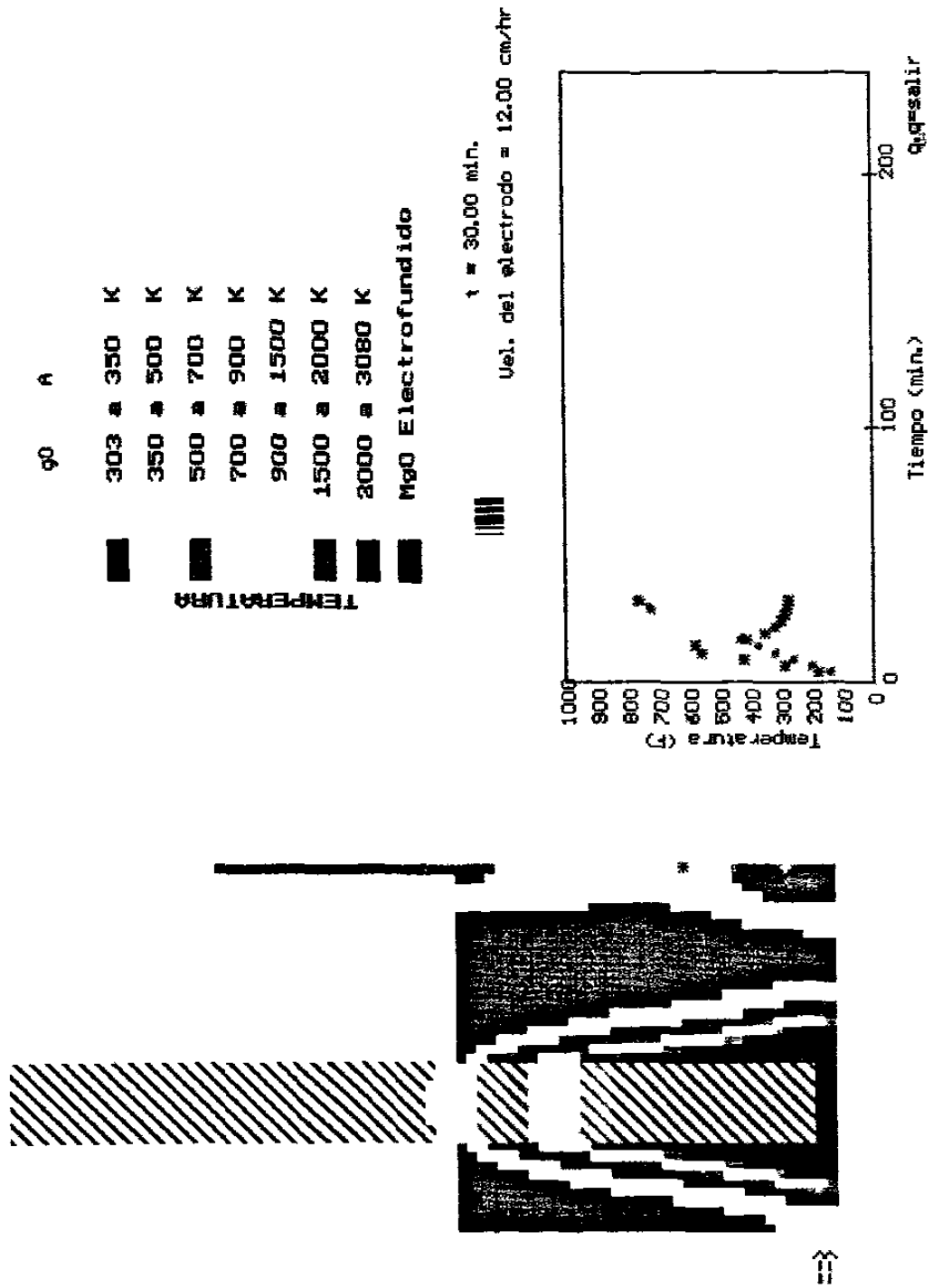


Fig. 30 Termograma grabado al simular 30 minutos.

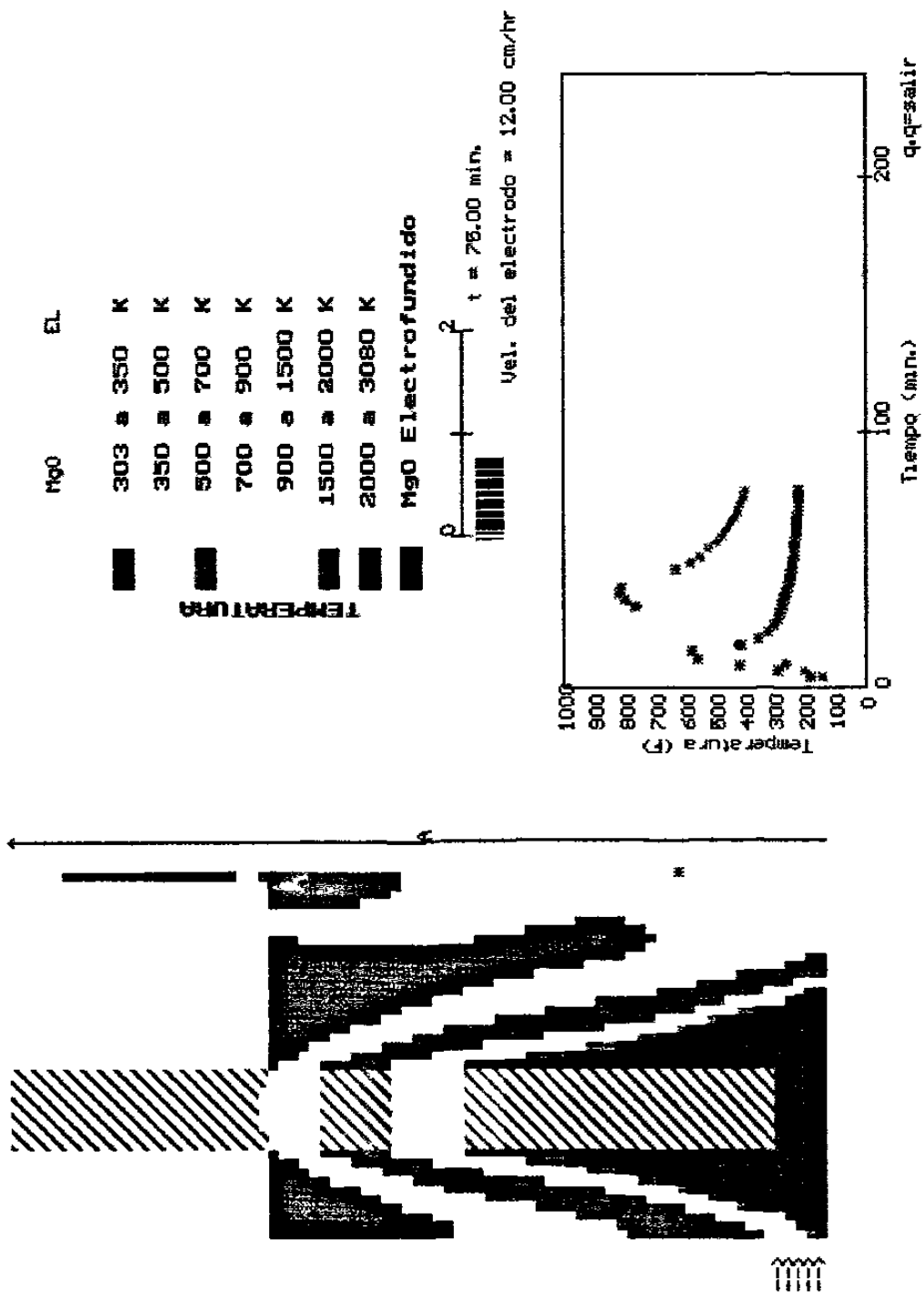


Fig. 31 Termograma grabado al simular 75 minutos.

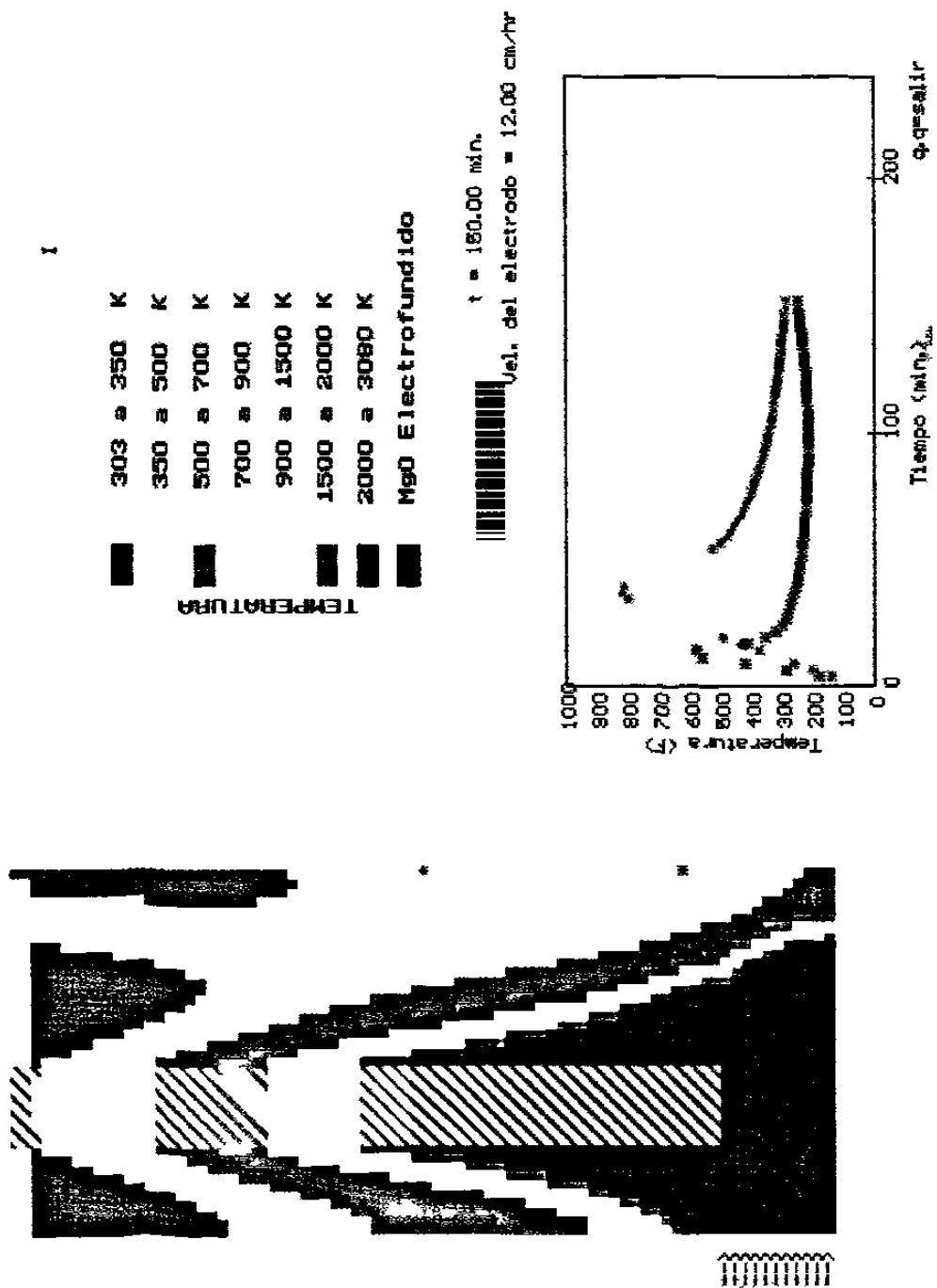


Fig. 32 Termograma grabado al simular 150 minutos.

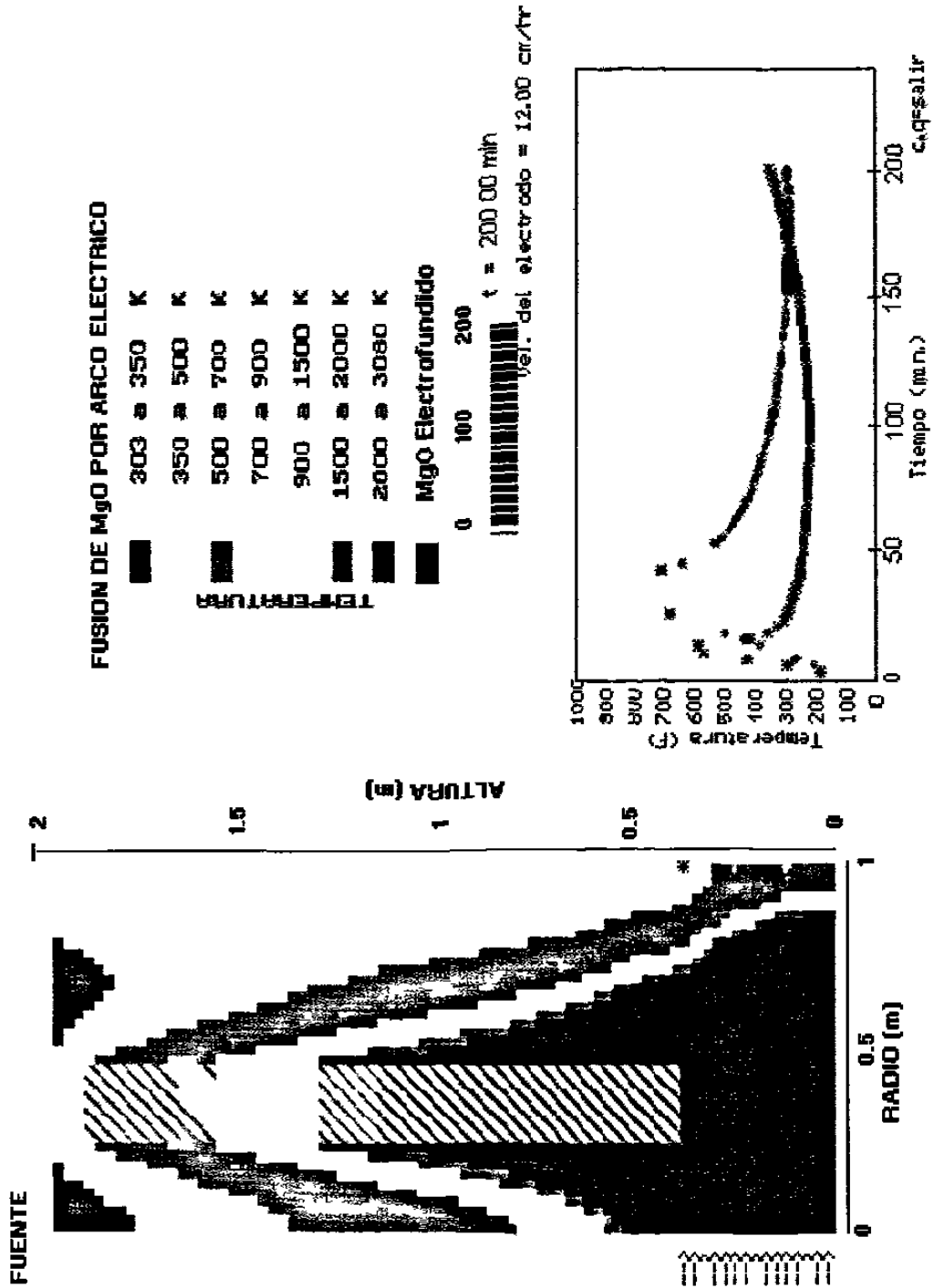


Fig. 33 Termograma grabado al simular 200 minutos.

CAPITULO 6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se desarrolló un simulador computacional utilizando el método numérico de balance de calor o de volumen de control el cual nos proporciona una perspectiva clara de como se calienta la coraza durante todo el proceso de fusión de MgO en un horno de arco eléctrico.

Se optó por considerar al material a fundir (MgO) en forma de briquetas como un lecho continuo con cierto valor de porosidad, esto tuvo como ventaja el poder discretizar el sistema de una manera más sencilla y práctica.

Se encontró que el sobrecalentamiento de la coraza es debido a dos causas: primero, al inicio de la fusión, la radiación desde el arco es la responsable; segundo, ya avanzada la fusión, el sobrecalentamiento se debe al mal acomodo del MgO dentro del horno pudiendo no proteger adecuadamente la coraza. Se descartó la hipótesis de que el MgO fundido pudiera llegar hasta la coraza y que por esa razón se sobrecalentaba.

Se encuentra que el mayor efecto térmico proviene de un exceso de energía o de una alimentación deficiente de MgO dentro del horno.

La variación estudiada en la velocidad de ascenso de los electrodos se vió que no tiene un efecto significativo en la variación de temperatura. Mientras que la variación del porcentaje de porosidad (ϵ) del lecho de MgO sí tiene influencia en la variación de temperatura de la coraza, aunque no es tanto como el efecto que se obtiene al variar la potencia eléctrica o la cantidad de material alimentado.

El simulador reproduce muy bien el comportamiento de la temperatura en función del tiempo de los puntos medidos experimentalmente.

Finalmente, el modelo puede ser utilizado como referencia para conocer comportamientos en cualquier punto desde el centro del horno hasta la coraza.

Se recomienda continuar con el estudio de la fusión de MgO. El estudio de la transferencia de calor dentro del horno puede ampliarse si se toman en cuenta todas las pérdidas de energía que nosotros despreciamos, como por ejemplo, la radiación hacia el exterior y la convección dentro del horno considerando los gases producidos al generar el arco eléctrico por los electrodos de grafito.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- 1.- Lehnann and Voss and Co., Magnesia, Herausgeber, Technical Paper, pp. 3, Hamburg, Germany, 1986.
- 2.- E. Velasco, Cambios físico-químicos de un refractario MgO-C después de servicio en horno de arco eléctrico, Tesis de Maestría, Universidad Autónoma de Nuevo León, Mty., México 1992.
- 3.- G.A. Castillo, Fusión de magnesia (MgO) en horno de arco eléctrico y su caracterización para la industria refractaria, Tesis de Maestría, Universidad Autónoma de Nuevo León, Mty., México 1992.
- 4.- W.D. Kingery, Introduction to ceramics, John Wiley and Sons Inc., 2^a ed., pp. 904 y 643, New York, 1975.
- 5.- R.H. Perry, Biblioteca del ingeniero químico, 5^a ed., McGraw Hill, New Jersey, 1986.
- 6.- J.P. Holman, Transferencia de calor, 2^a ed., CECOSA, México, D.F. 1986, pp. 18,20,28.

- 7.- J.R. Welty, Transferencia de calor aplicada a la ingeniería, 1^a ed., LIMUSA, México, D.F., 1992, pp. 49 y 13.
- 8.- J. Szekely and J.W. Evans, Gas solid reactions, Massachusetts Institute of Technology, Boston, pp 52, 1982.
- 9.- Beckwith, Marangoni y Lienhard, Mechanical Measurements, capítulo 16, 5^a ed., McGraw Hill, New Jersey, 1993.

LISTA DE TABLAS

Tabla	Descripción	Pág.
1	Propiedades físicas del MgO.	8
2	Resistividad eléctrica del MgO a varias temperaturas.	10
3	Valores aproximados de transferencia de calor por convección.	24
4	Matriz de datos utilizados en cada una de las simulaciones.	54

LISTA DE FIGURAS

Fig	Descripción	Pág.
1	Celda unitaria de MgO.	7
2	Conductividad eléctrica de los mejores aislantes cerámicos.	8
3	Conductividad térmica de algunos materiales.	9
4	Representación de la base del horno.	10
5	Representación de la coraza del horno.	12
6	Esquema representativo de los electrodos.	16
7	Vista superior del horno mostrando el arco teórico formado	25
8	Representación del volumen de control en una dimensión.	31
9	Esquemas implícito, explícito y Crank-Nicholson.	34
10	Ejemplo de una discretización en dos dimensiones.	36
11	Vista superior del horno de como se tomó la sección A.	36
12	Discretización de sección típica A.	37
13	Esquema de como se colocaron los termopares.	48
14	Vista superior del horno mostrando en el ángulo en el que se colocaron los termopares.	49

15	Gráfica de los resultados de la prueba 1.	52
16	Gráfica de los resultados de la prueba 2.	52
17	Gráfica de los resultados de la prueba 3.	52
18	Gráfica obtenida al utilizar los datos para la simulación 1.	55
19	Gráfica obtenida al utilizar los datos para la simulación 2.	58
20	Gráfica obtenida al utilizar los datos para la simulación 3.	59
21	Gráfica obtenida al utilizar los datos para la simulación 4.	60
22	Gráfica obtenida al utilizar los datos para la simulación 5.	61
23	Gráfica obtenida al utilizar los datos para la simulación 6.	62
24	Gráfica obtenida al utilizar los datos para la simulación 7.	63
25	Gráfica obtenida al utilizar los datos para la simulación 8.	64
26	Gráfica obtenida al utilizar los datos para la simulación 9.	65
27	Gráfica obtenida al utilizar los datos para la simulación 10.	66
28	Comparación entre resultados medidos y calculados.	67
29	Explicación de lo que representa cada parte vista en un termograma.	68
30	Termograma grabado al simular 15 minutos.	69
31	Termograma grabado al simular 30 minutos.	70
32	Termograma grabado al simular 75 minutos.	71
33	Termograma grabado al simular 150 minutos.	72
34	Termograma grabado al simular 200 minutos.	73

ANEXO

Resultados experimentales representativos de cada grupo de pruebas.

Grupo 1		Grupo 2		Grupo 3	
Tiempo (min.)	Temperatura (°F)	Tiempo (min.)	Temperatura (°F)	Tiempo (min.)	Temperatura (°F)
0	134	0	130	0	128
5	348	5	363	5	353
10	526	10	583	10	545
15	474	15	501	15	492
20	424	20	439	20	420
25	380	25	395	25	377
30	332	30	347	30	335
35	302	35	305	35	305
40	304	40	298	40	290
45	297	45	293	45	278
50	287	50	285	50	270
55	279	55	275	55	265
60	268	60	264	60	255
65	261	65	255	65	247
70	255	70	253	70	240
75	251	75	252	75	239
80	247	80	250	80	236
85	243	85	246	85	230
90	241	90	243	90	227
95	236	95	238	95	223
100	234	100	237	100	220
105	231	105	233	105	218
110	229	110	230	110	215
115	227	115	229	115	213
120	227	120	229	120	210
125	225	125	229	125	211
130	224	130	231	130	212
135	224	135	231	135	215
140	226	140	236	140	219
145	229	145	241	145	226
150	235	150	244	150	234
155	242	155	252	155	245
160	250	160	263	160	257
165	258	165	275	165	268
170	268	170	289	170	277
175	278	175	305	175	293
180	288	180	323	180	309
185	302	185		185	
190	317	190		190	

RESUMEN AUTOBIOGRAFICO

Carlos Evaristo Esparza Garcés nació en Reynosa, Tamaulipas, México, el 15 de Abril de 1969. Obtuvo el título de Ingeniero Mecánico Electricista en la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Universidad Autónoma de Nuevo León, habiendo terminado la carrera en 1992. Ese mismo año inició la Maestría en Ingeniería con Especialidad en Materiales en el DIMAT (Doctorado en Ingeniería de Materiales) de la U.A.N.L. becado por CONACYT.

En 1994, ingresó a trabajar en la empresa CERREY S.A. de C.V. en el departamento de Diseño Automático de Calderas.

En Noviembre de ese mismo año, pasa a formar parte de la empresa NEMAK S.A. desempeñándose como encargado de la cuenta de FORD en el departamento de CAD/CAM utilizando el software que este cliente utiliza. También realiza estudios y simulaciones de llenado y solidificación del aluminio dentro del molde utilizando el software MAGMASOFT.

Es miembro de la American Society of Mechanical Engineers.

En sus ratos libres juega Ajedrez.

Dirección Permanente:

Zaragoza #599 Pte., Zona Centro

Reynosa, Tamps. C.P. 88500

Tel.: (89) 22-5836

E-mail: carlos-esparza@geocities.com

URL: <http://www.geocities.com/SiliconValley/2860>

