

20  
2el.



**UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTONOMA DE MEXICO**

**FACULTAD DE QUIMICA**



**EXAMENES PROFESIONALES  
FAC. DE QUIMICA**

**CONSIDERACIONES TERMICAS  
EN EL HORNO OLLA.**

**T E S I S**  
**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:**  
**INGENIERO QUIMICO METALURGICO**  
**PRESENTA:**  
**ISMAEL REYES DIAZ**



MEXICO, D.F.

1997

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

**JURADO ASIGNADO:**


<b>Presidente</b>	<b>Dr. Fidel Reyes Carmona.</b>
<b>Vocal</b>	<b>M. en C. Alberto Ingalls Cruz.</b>
<b>Secretario</b>	<b>M. en C. Antonio Huerta Cerdán.</b>
<b>1er. Suplente</b>	<b>M. en C. Arturo Ortega Rodríguez.</b>
<b>2do. Suplente</b>	<b>I.Q.M. Sergio García Galán.</b>

**SITIO DONDE SE DESARROLLO EL TEMA:**

***GRUPO INDUSTRIAL N.K.S., S.A. DE C.V. y  
FACULTAD DE QUÍMICA, EDIF. "D".***



**Dr. Fidel Reyes Carmona.  
ASESOR DEL TEMA**



**Ismael Reyes Díaz.  
SUSTENTANTE**

Dedicatorias:

Dedico éste trabajo a las personas más importantes en mi vida, a mis padres

Dr. Abel Reyes Carmona  
Q.F.B. Leopoldina Díaz Montero

a mi hermano mayor

Lic. Abel Reyes Díaz

y a mi "chata"

Alejandra Rosas Romo.

Agradecimientos:

A la Universidad Nacional y a la Facultad de Química por darme la oportunidad de haber obtenido una educación profesional y ser parte de ellas.

Al Grupo Industrial N.K.S., S.A. de C.V. por darme la oportunidad de realizar parte de éste trabajo en sus instalaciones, en especial a toda la gente que integra la Nave de Acería.

Al las personas que me apoyaron de manera incondicional para realizar éste trabajo y me refiero al Dr. Fidel Reyes y al M. en C. Alberto Ingalls; cuyos consejos, enseñanzas y recomendaciones fueron un aliciente para seguir adelante.

A las personas que me brindaron o me siguen brindando su amistad, primero los que conocí en Puebla. Y aquí va la lista:

Irma H., Yorz, Marga, Eddy, Lili D., Jimena D., Efra<sup>l</sup>, Jorge Mtz., Héctor y Erika, Amaury T., Bety E., Freddy y su familia, a las apachoides, a toda la familia Herrera Aguirre, a la familia Rosas Romo, a mis cuñados Luis y Alex.

A los amigos que tuve la oportunidad de conocer gracias al Fútbol Universitario y con los cuales pase momentos inolvidables, jugando el deporte que más quiero. Aquí va otra lista:

Juanito Rodríguez, Juan M. Calderón, David Nieto "gordo", Ricardo Gtz., Alfredo Hdz. "el pelón", Rafael Reyes "Fafa", Luis Olvera " el Tyson", Garay, Carlos Jardón "Charly Chapula", Mauricio Valadéz "el Mac", Alejandro "Penacho", José "el chapu", Raúl Cómora, Jorge "el zurdito", Maturano, Raúl "el portero", Fco. Origel "el ahijado", Héctor "el feo", Oscar "chacaritas", Esparza, Marco S. "quino", Reynaldo "rey", Enrique Luviano.

A los amigos que tuve la oportunidad de conocer en la Universidad. Aquí va la última lista:

Lili Limón, Juanito B. "el pavo", Néstor "Don Pachou", Saúl "el capi", Armando "el gado", Lulú B., Luz Elena A., Emma A., Paty y Angel, Hada y Peter, Abraham "el carnalito", Gaby Mtz., José N. "el chepe", Romualdo O. "Roma", Luis H. "gonzaguita", Fernanda Z., Gaby Z., Arturo Z. "el Zayas", Juan José A. "la mitota", Leonardo N., Lety Trejo, Bety C.

TABLA DE CONTENIDO.

Tabla de contenido .....	1
Lista de tablas .....	iii
Lista de figuras .....	iv
Lista de símbolos .....	v
I.RESUMEN .....	1
II.INTRODUCCIÓN .....	3
III.NATURALEZA DEL PROBLEMA .....	5
IV.TRANSPORTE DE METAL LÍQUIDO MEDIANTE LA OLLA .....	6
V.MODELO MATEMÁTICO .....	8
VI.RESULTADOS.....	13
VII.ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	21
VIII.CONCLUSIONES .....	25

BIBLIOGRAFÍA .....	26
APÉNDICES.	
APÉNDICE I. ECUACIÓN GENERAL PARA NODOS NO INTERCARA. ....	28
APÉNDICE II. ECUACIÓN GENERAL PARA LOS NODOS INTERNOS. ....	29
APÉNDICE III. ECUACIÓN GENERAL PARA LOS NODOS EXTERNOS. ....	31
APÉNDICE IV. DESARROLLO DE LAS ECUACIONES GENERALES PARA LAS FRONTERAS EXTERNAS. ....	32
APÉNDICE V. ECUACIÓN GENERAL QUE DESCRIBE EL ENFRIAMIENTO. ....	34
APÉNDICE VI. ECUACIÓN GENERAL QUE DESCRIBE AL CALENTAMIENTO DEBIDO AL VACIADO DE METAL LÍQUIDO. ....	35
APÉNDICE VII. PREDICCIÓN DE LA TEMPERATURA FINAL DEL ACERO LÍQUIDO (TFA). ....	36
APÉNDICE VIII. ARREGLO DE ECUACIONES. ....	37
APÉNDICE IX. PROPIEDADES Y COSTOS. ....	38
APÉNDICE X. PROGRAMA DE CÓMPUTO. ....	39

LISTA DE TABLAS.

Tabla 1. Comparación entre las temperaturas tomadas en planta y las predichas mediante el modelo. ....	25
Tabla 2. Propiedades termofísicas del acero y de los materiales que recubren a la olla. ....	38
Tabla 3. Periodos y costos de reparación aproximados para las ollas de N.K.S., S.A. de C.V. ....	38



LISTA DE FIGURAS.

Figura 1. Representación unidimensional de una olla. ....	8
Figura 2. Discretización nodal de la olla. ....	9
Figura 3. Representación del fenómeno radiante para las superficies de la olla y su analogía eléctrica. .11	
Figura 4. Perfiles térmicos calculados a diferentes tiempos de precalentamiento para una olla de 40 T. ....	13
Figura 5. Perfiles térmicos que simulan el enfriamiento de una olla de 40 T., la cual se precalentó 10.3 horas. ....	15
Figura 6. Perfiles térmicos que simulan el calentamiento del refractario de una olla de 40 T. a tres distintas temperaturas de vaciado, la cual se precalentó 10.3 horas y luego se sujetó a un enfriamiento de 20 minutos. ....	16
Figura 7. Variación del suministro de energía con respecto al tiempo, para ollas de 40 y 60 T., debido al quemado de combustóleo. ....	17
Figura 8. Cambio energético con respecto al tiempo, para una olla de 40 T., debido al enfriamiento de la misma. ....	17
Figura 9. Variación del suministro de energía con respecto al tiempo, para una olla de 40 T., debido al vaciado de metal líquido. ....	18
Figura 10. Variación en la temperatura del metal líquido debida al tiempo de traslado de la olla. ....	19

## LISTA DE SÍMBOLOS.

$A_{e,i}$  = área externa o interna de la olla.

AC1, BC1, DC1, XR1 = constantes del material refractario.

$a_i$ ,  $b_i$ ,  $d_i$  = constantes de cada material m.

cc = capacidad calorífica del acero líquido.

$Cp_m$  = capacidad calorífica del material m.

$Cp_{m,-i}$  = capacidad calorífica del material a la izquierda del nodo i.

$Cp_{m,+i}$  = capacidad calorífica del material a la derecha del nodo i.

$Cp_R$  = capacidad calorífica del material refractario.

$\overline{Cp}$  = capacidad calorífica promedio para los nodos interfrontera.

$D_i$  = diametro interno de la olla.

E = emisividad<sup>[2]</sup>.

$E_m$  = espesor para cada material m.

$E_{b_{sup}}$  = emisividad de la superficie 1.

$E_{b_{aire}}$  = emisividad de la superficie 2.

$E_{pot.}^{olla}$  = energía potencial que posee la olla.

F = factor de forma<sup>[2]</sup>.

F0A = No. de Fourier para el material aislante 1.

F0C = No. de Fourier para la chapa de acero.

F0R = No. de Fourier para el material refractario.

F0S = No. de Fourier para el material aislante 2.

F0P1 = No. de Fourier relativo a la interfrontera del nodo 12.

F0P2 = No. de Fourier relativo a la interfrontera del nodo 18.

F0P3 = No. de Fourier relativo a la interfrontera del nodo 24.

F0m = No. de Fourier relativo a cada material m.

- $F_{12}$  = fracción de energía que sale de la superficie 1 y que golpea a la superficie 2.  
 $E_{21}$  = fracción de energía que sale de la superficie 2 y que golpea a la superficie 1.  
 $fMm_{i-1}$  = fracción masica del material a la izquierda del nodo i.  
 $fMm_{i+1}$  = fracción masica del material a la derecha del nodo i.  
 $fVm_{i-1}$  = fracción volumínica del material a la izquierda del nodo i.  
 $fVm_{i+1}$  = fracción volumínica del material a la derecha del nodo i.  
 HAC = coeficiente de transferencia de calor por convección para acero líquido.  
 $k_m$  = conductividad termica de cada material.  
 L = longitud de la olla.  
 m = m = tipo de material.  
 mag = masa de acero líquido contenido en la olla.  
 NTN = numero total de nodos.  
 $Q_{Ar}$  = calor cedido debido a la insuflación de argón.  
 $Q_{coque}$  = calor aportado por la adición de coque.  
 $Q_c$  = flujo de calor por convección del líquido hacia la pared del refractario.  
 $Q_{11}$  = flux de calor interno<sup>[2]</sup>.  
 $Q_{1E}$  = flux de calor externo<sup>[2]</sup>.  
 $Q_i$  = flux de calor interno.  
 $Q_E$  = flux de calor externo.  
 $Q_{esc}$  = calor cedido debido a la capa de escoria.  
 $Q_{fundos}$  = calor cedido debido a la adición de fundentes.  
 $Q_{HRV}$  = calor aportado por el H.R. V. .  
 $Q_{i \rightarrow i+1}$  = flux de calor por conducción desde el nodo i y hacia el nodo i + 1.  
 $Q_{i-1 \rightarrow i}$  = flux de calor por conducción desde el nodo i - 1 y hacia el nodo i.

$Q_{rad}^{neto}$  = flujo de calor por radiación.

$Q_{liq \rightarrow amb}^{rad}$  = flujo de calor por radiación del líquido hacia el medio ambiente.

$Q_{r,q}$  = calor aportado por las reacciones químicas.

$Q_{liq \rightarrow r}^{conv}$  = flujo de calor por convección del líquido hacia el refractario.

$Q_{2 \rightarrow 1}^{cond}$  = flujo de calor por conducción desde el nodo 2 y hacia el nodo 1.

$Q_{vac}$  = calor aportado por el vaciado de metal líquido.

$r_i$  = radio interno de la olla.

$r_e$  = radio externo de la olla.

TAM F = temperatura del medio ambiente.

TAM = temperatura del medio ambiente.

TICF = temperatura máxima de precalentamiento.

TIC = temperatura máxima de precalentamiento.

T(i) = temperatura del nodo i.

$T_i^t$  = temperatura del nodo central i al tiempo futuro t.

$T_i^{t+1}$  = temperatura del nodo central i al tiempo t + 1.

$T_{i-1}^{t+1}$  = temperatura del nodo a la derecha de i al tiempo t + 1.

$T_{i+1}^{t+1}$  = temperatura del nodo a la izquierda de i al tiempo t + 1.

TFA = temperatura final del acero líquido para cada tiempo t.

TVA = temperatura de vaciado del acero líquido.

$Q_{rad}^{neto}$  = flujo de calor por radiación.

$Q_{liq \rightarrow amb}^{rad}$  = flujo de calor por radiación del líquido hacia el medio ambiente.

$Q_{r,q}$  = calor aportado por las reacciones químicas.

$Q_{liq \rightarrow 1}^{conv}$  = flujo de calor por convección del líquido hacia el refractario.

$Q_{2 \rightarrow 1}^{cond}$  = flujo de calor por conducción desde el nodo 2 y hacia el nodo 1.

$Q_{vac}$  = calor aportado por el vaciado de metal líquido.

$r_i$  = radio interno de la olla.

$r_e$  = radio externo de la olla.

TAM F = temperatura del medio ambiente.

TAM = temperatura del medio ambiente.

TICF = temperatura máxima de precalentamiento.

TIC = temperatura máxima de precalentamiento.

T(i) = temperatura del nodo i.

$T_i^t$  = temperatura del nodo central i al tiempo futuro t.

$T_i^{t+1}$  = temperatura del nodo central i al tiempo t+1.

$T_{i,-1}^{t+1}$  = temperatura del nodo a la derecha de i al tiempo t+1.

$T_{i,-1}^{t+1}$  = temperatura del nodo a la izquierda de i al tiempo t+1.

TFA = temperatura final del acero líquido para cada tiempo t.

TVA = temperatura de vaciado del acero líquido.

### ***Símbolos Griegos:***

$\Delta r_m$  = diferencia de distancia entre un nodo y otro .

$\Delta t$  = diferencia de tiempo.

$\Delta T$  = diferencia de temperatura .

$\Delta V_i$  = diferencia de volumen .

$\epsilon_r$  = emisividad del material refractario.

$\eta$  = pérdidas de calor.

$\pi$  = pi = 3.14159.

$\rho_m$  = densidad del material m.

$\rho_{m_{i+1}}$  = densidad del material a la derecha del nodo i.

$\rho_{m_{i-1}}$  = densidad del material a la izquierda del nodo i.

$\bar{\rho}$  = densidad promedio relacionada con los nodos en intercarras internas.

$\rho_r$  = densidad del material refractario.

$\sigma$  = constante de Stefan Boltzmann.

## I. RESUMEN.

Debido al ahorro energético que demanda la producción de acero, refinado secundariamente mediante la ruta del "horno olla", en este trabajo se presentan resultados obtenidos a través de un modelo matemático, los cuales se evalúan a partir de datos recabados en una planta siderúrgica.

El desarrollo del modelo consistió en considerar a la transferencia de energía en la olla, como un fenómeno unidireccional y en estado inestable. En este modelo se consideran tanto a las capas de refractario, como a la chapa de acero que acorazan a la olla.

El efecto del transporte de energía sobre el refractario en la parte interna de la olla se contabiliza en la mayoría de sus formas.

Esto es, la energía que se suministra a la olla durante su precalentamiento, así como, la energía que recibe debido al vaciado del metal líquido a su interior. Para estos 2 casos, dicho efecto es convectivo.

Además, se contabiliza otro efecto sobre el material refractario, éste se presenta debido al enfriamiento que sufre la olla cuando a ésta se le traslada desde el área de precalentado, hasta la zona de vaciado del horno eléctrico de arco, así, para éste caso, el efecto es radiante.

El consumo de energía más alto, como se espera, es el que pierde el refractario, sobre todo cuando el precalentado de la olla no es el apropiado.

Por otro lado, las contribuciones energético-químicas no son significativas, mientras que, el consumo de energía debido al calentamiento del metal líquido ó el debido a la agitación con argón, resultarán ser los más significativos, durante el proceso de refinación del metal líquido.

El balance de energía en las partes anteriormente descritas, con respecto a la energía que se adiciona mediante el arco eléctrico sumergido, conduce al logro de una mayor eficiencia térmica en el proceso. Todo esto, se refleja en una mayor vida útil de la olla.

Además, gracias al modelo, se puede hacer una predicción de la temperatura con la que el metal líquido llega a la estación donde se encuentra el Horno de Retención con Vacío (H.R.V.).

Se puede observar que el modelo matemático, después de ser validado, proporciona resultados bastante cercanos a los obtenidos en la planta.

El modelo matemático presenta algunas limitantes:

- Se considera flujo unidireccional de energía.
- Para el análisis matemático que se realizó sobre la olla, no se considera a la parte basal de la misma. Esto, para efecto de un manejo sencillo de las ecuaciones obtenidas. Porque, la transferencia de energía se da a través de las paredes de la olla y en dirección radial.

- Las propiedades termofísicas de cada material que componen el recubrimiento de la olla, se mantienen constantes durante todo el intervalo de temperaturas de trabajo; porque, en el intervalo de temperatura al que se someten los materiales refractarios, no se presenta variación en las propiedades termofísicas de dichos materiales.



## II. INTRODUCCIÓN.

A nivel industrial, se observa que una de las partes primordiales que se debe optimizar durante todo el proceso de refinación es el consumo de energéticos, el cual está íntimamente ligado a los costos de producción de cualquier producto siderúrgico.

Las ollas utilizadas para éste tipo de refinación, se emplean tanto como receptoras del metal líquido proveniente de COBOX (Convertidor Básico de Oxígeno) ó de H.E.A. (Horno Eléctrico de Arco); así como recipientes en donde se llevará a cabo la refinación secundaria del baño líquido.

Por otra parte, a estas ollas se les dá un tratamiento previo al vaciado, el cual consiste en un precalentamiento mediante el uso de un quemador de gas.

Este precalentamiento se lleva a cabo durante varias horas, con el fin de garantizar una buena temperatura sobre la pared refractaria interna y así evitar un choque térmico fuerte, en el momento de vaciar el líquido (proveniente del H.E.A. ó B.O.F.) al interior de la olla.

En estudios realizados<sup>(1)</sup> sobre éste tema, se indica que existen materiales para recubrir el interior de las ollas, con propiedades termofísicas y mecánicas útiles que mejoran el precalentado de las mismas.

Una de las etapas que más preocupan a la mayoría de las plantas acereras, es el precalentado de las ollas, razón por la cual éste se estudia. Sin embargo, se debe analizar, tanto el enfriamiento de la olla debido a su traslado desde la zona de precalentamiento hasta la fosa de vaciado; así como, su calentamiento posterior debido al vaciado del acero líquido dentro de la misma, ya que las tres etapas son parte del mismo proceso.

Para poder simular los cambios energéticos en cada una de estas etapas, fue necesaria la elaboración de un modelo matemático.

Algunos modelos para conocer la historia térmica de una olla, ya han sido desarrollados, y es en base a esas referencias que se elaboró éste modelo, el cual se adecuó al tipo de condiciones de trabajo de la planta de N.K.S.

De estos trabajos previos<sup>(2,3)</sup> y con base en la transferencia de calor por conducción, convección y radiación en estado no estable, además del uso de un método numérico de solución; se desarrolló un modelo matemático para optimizar térmicamente a este proceso.

La elaboración y descripción de dicho modelo se presentará más adelante.

Mediante el modelo matemático se cuantificarán las contribuciones ó pérdidas energéticas más significativas

durante parte del proceso y bajo las condiciones de trabajo específicas.

Dichas contribuciones o pérdidas, se encuentran presentes en cada una de las etapas en donde se involucra a la olla: precalentado con combustóleo, enfriamiento por traslado y calentamiento por vaciado de metal líquido dentro de la misma.

Con la información aportada por alrededor de 45 coladas de la planta de N.K.S., se validó este modelo.

### III. NATURALEZA DEL PROBLEMA.

Como se sabe, la metalurgia de la olla consiste en la refinación secundaria del acero, el cual puede partir ya sea de acero primario líquido obtenido vía alto horno, carro torpedo y COBOX ó de acero primario obtenido al refundir chatarra y otros insumos en el H.E.A.

El proceso de refinación puede incluir cualquiera de los siguientes tratamientos:

A). Alto índice de desoxidación con Aluminio, previo a un alto grado de desulfuración y un tratamiento con aleaciones a base de Calcio para inducir el control de forma de los precipitados<sup>(1-4)</sup>.

B). Desoxidación, desulfuración y desgasificación mediante vacío para obtener un acero de mayor limpieza y

C). Recalentamiento del sistema escoria/metál/refractario mediante arco eléctrico sumergido. Esta adición de energía que se le hace al metal líquido sirve para contrarrestar los efectos de las adiciones de sólidos y/o gases al metal líquido durante su procesamiento.

El caso particular que ocupa a este trabajo, es en principio el más simple, desde el punto de vista térmico, ya que sólo se incluyen los siguientes aspectos:

(1) El efecto del precalentamiento sobre las paredes de las ollas mediante el quemado de combustibles previo al vaciado del metal líquido desde el H.E.A.

(2) El efecto del enfriamiento sobre las paredes debido al traslado de las ollas hacia la zona de vaciado, y

(3) El efecto del calentamiento sobre las paredes de las ollas debido al vaciado del metal líquido dentro de las mismas.

Todos estos efectos, se reflejan directamente en la cantidad de energía que se suministra al metal líquido mediante arco eléctrico sumergido en la zona de refinación con vacío, ya que el metal líquido llega a esta zona con mucho menor energía que cuando sale del H.E.A. Dicha disminución energética se debe al traslado de la olla desde el H.E.A. hasta la zona de refinación.

Si el metal líquido proveniente del H.E.A. se controla en sus pérdidas de energía térmica, entonces deberá esperarse un menor consumo de energía eléctrica (la cual se utiliza para producir el arco sumergido) y así, proveer al metal líquido de la temperatura de vaciado que éste requiera.

Por lo tanto, si se determina la naturaleza y magnitud de los consumos de energía vía calentamiento de refractarios y metal líquido, se optimizará a este proceso desde el punto de vista térmico.

#### IV. TRANSPORTE DEL METAL LÍQUIDO MEDIANTE LA OLLA.

La empresa N.K.S., S.A. de C.V. cuenta con un Horno Eléctrico de Arco (H.E.A.) cuya capacidad es de 48 Ton., en el cual se funde chatarra previamente clasificada. Una vez terminada la fusión, el acero líquido se vacía a alguna de las ollas; ya sea, la de 40 o la de 60 Ton. de capacidad. Previamente al vaciado del metal líquido, se precalienta alguna de las ollas mediante un quemador horizontal. La temperatura máxima que alcanza dicho quemador es de aproximadamente 1100 °C.

Cuando la olla está fría, es decir, que no ha sido utilizada en al menos 2 días, ésta se precalienta entre 10 y 11 horas. Sin embargo, cuando se considera que no está fría (menos de 24 horas), esta se precalienta entre 7 y 8 horas.

Una vez terminado el precalentamiento, el quemador se retira y la olla se traslada hacia la fosa de vaciado. Ahí, ésta se coloca para recibir el acero líquido que proviene del H.E.A. Un poco antes de iniciar el vaciado, se agrega cierta cantidad de ferroaleaciones, así como, granalla de fierro, dependiendo del tipo de acero que se requiera elaborar.

Durante el vaciado, se adiciona: aluminio, ya sea en forma de lamina ó de barra, 1 ó 2 costales de 25 kg. de carbón de petróleo ("carbooster"), y el resto de las ferroaleaciones.

Antes de vaciar el acero líquido que aún se encuentra en el interior del H.E.A., se mide su temperatura, la cual regularmente oscila entre 1660 a 1700 °C; y una vez que finaliza el vaciado se mide nuevamente la temperatura del baño. A este punto, se espera que ésta sea de aproximadamente 1600±10 °C; además, se toma una muestra para analizar su composición. Todo esto se hace poco antes de que la olla se lleve hacia el área de calentamiento y desgasificado, en donde se encuentra el Horno de Retención con Vacío (H.R.V.).

Una vez que la olla se coloca en el carro transportador que la conducirá al área del H.R.V., se comienza la inyección de argón por el fondo de la misma; la cual se realiza mediante un tapón poroso.

Cuando la olla llega a la zona de calentamiento se mide la temperatura del baño, la cual oscila entre 1555±15 °C.

Después de realizar dicha medición, se adiciona fluorita y cal; posteriormente, se inicia el calentamiento del baño mediante la aplicación de arco eléctrico, ya que con dichas adiciones y por el transporte de la olla el líquido se enfría.

El metal líquido se calienta hasta alcanzar temperaturas entre 1610 a 1630 °C. Adicionalmente, durante el lapso de tiempo que dura el calentamiento, se hacen ajustes composicionales mediante la adición de ferroaleantes y "carbooster", para así obtener una composición preliminar.

Una vez que se alcanza la temperatura deseada, se deja de suministrar energía via arco eléctrico y la olla se traslada hacia la zona de desgasificado. Ahí, se le coloca una campana sobre su parte superior. Esta deberá estar bien sellada para evitar fugas de vacío. Regularmente, se desgasifica al metal líquido entre 18 y 22 minutos, con una presión menor a 1 Torr (0.8 a 0.5). Sin embargo, el tiempo total que permanece la olla en esta zona es de aproximadamente 30 minutos.

Una vez que el metal líquido contenido en la olla se desgasifica, se mide nuevamente su temperatura y se manda una muestra al laboratorio. La temperatura del baño metálico oscilará entre  $1535 \pm 15$  °C.

Dependiendo el tipo de acero, se hace un ajuste final a la composición del metal líquido y el baño se calienta nuevamente hasta alcanzar la temperatura requerida a la salida del H.R.V.; la cual oscilará en un intervalo de  $1570 \pm 10$  °C.

Una vez que se alcanza dicha temperatura y la composición química es la idónea, se deja de suministrar energía via arco eléctrico, finalizando así el calentamiento. Inmediatamente después se adicionan 1 ó 2 barras de aluminio al metal líquido.

La olla que se encuentra sobre el carro transportador, sale de la zona de calentamiento y durante ese lapso de tiempo, se le adicionan al líquido 5 ó 6 bolsas de polvo aislante de 5 kg. cada una.

La olla se traslada ya sea hacia la zona de colado de lingotes o bien hacia el área de fundición, en donde se vaciará el metal líquido en los moldes elaborados especialmente para la obtención de piezas de gran peso.

A esta operación de colado se le conoce como "colado por el fondo".

Una vez que se inicia dicho procedimiento, se mide la temperatura del chorro de metal líquido, la cual oscila entre  $1525 \pm 15$  °C e inmediatamente después se toma una muestra para su análisis químico posterior.

Al finalizar la colada, la olla se lleva al área de limpieza. Ahí se le elimina, tanto la escoria adherida al refractario además del acero líquido remanente.

Al término de esta etapa, la olla se coloca nuevamente en el área de precalentamiento junto al quemador horizontal.

## V. MODELO MATEMÁTICO.

Como se mencionó en la sección IV, el ciclo que sigue la olla es el siguiente:

i) Calentamiento convectivo de la superficie interna de la olla por quemado de combustóleo.

ii) Enfriamiento por radiación debido a la interacción de la superficie interna de la olla con la atmósfera.

iii) Calentamiento de la superficie interna de la olla, a partir del acero líquido que se encuentra dentro de la misma.

iv) Enfriamiento del metal líquido al trasladar la olla hacia la zona de refinación con vacío.

Si se contabilizan cada una de las partes que componen a éste ciclo, el análisis térmico análogo se puede realizar considerando al sistema bajo estudio como se muestra en la figura 1<sup>(2)</sup>.

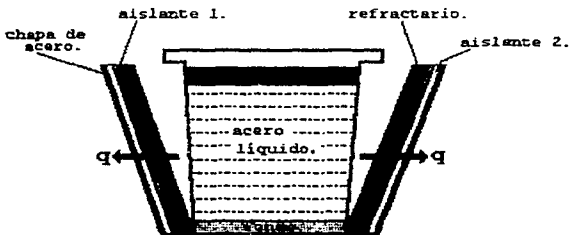


Figura 1<sup>(2)</sup> . Representación unidimensional de una olla.

Dicha figura muestra la dirección radial en la que el flujo térmico será calculado, esto, sin tomar en cuenta a la parte basal de la olla.

Para optimizar el consumo energético del ciclo anteriormente descrito, aunque esto sea de una manera aproximada; es necesario elaborar un modelo numérico que contabilice la historia térmica completa de dicho ciclo, en el que se cuantifique a cada una de sus partes individuales.

Estas 4 etapas que constituyen al ciclo térmico, se modelaron utilizando la técnica implícita de diferencias finitas.

No obstante, se sabe las propiedades termofísicas de los materiales que componen a la olla varían con respecto a la temperatura, pero en el presente trabajo, dichas variaciones no son significativas, ni restrictivas para efectuar el cálculo de transporte de energía en todo el intervalo de temperaturas de trabajo, por lo tanto, todas estas propiedades se consideran constantes.

La representación esquemática de los 4 materiales que constituyen a la olla, así como, su respectiva discretización nodal, se muestran en la figura 2. Donde E1, E2, E3 y E4 representan a los espesores de los materiales: refractario, aislante 1, aislante 2 y chapa de acero, respectivamente.

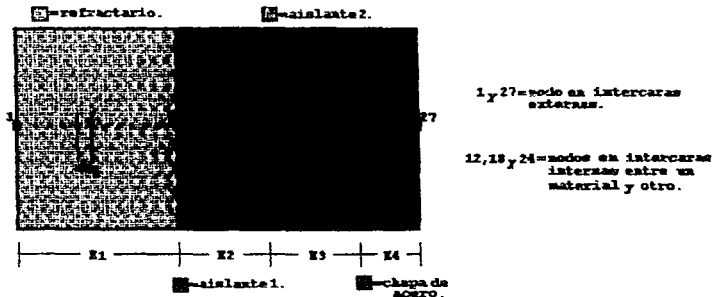


Figura 2. Discretización nodal de la olla.

La ecuación que representa a la transferencia de energía en un material dado, se obtiene al realizar un balance en el punto nodal respectivo. Dicha ecuación, en su forma general se desgloza en el Apéndice I.

Como se aprecia en la figura 2, existen nodos en intercaras, las cuales son de 2 tipos: Internas y externas.

En el análisis de los nodos 12, 18 y 24, su volumen  $[AV]$  se considera constante y se contabiliza en el cambio de la energía interna un valor de  $C_p$  y densidad promedios.

La ecuación que resulta del balance de los nodos internos, se muestra en el Apéndice II.

Los nodos externos son los ubicados en la posición nodal 1 y 27 de la figura 2.

Cabe señalar, que el nodo 1, es el nodo de mayor importancia, ya que los estímulos térmicos que sufre la masa total de los materiales que componen a la olla (los cuales se refirieron como componentes del ciclo i a iv), todos ellos definitivamente se realizan a través del primer nodo.

Dichos estímulos son introducidos al modelo matemático como condiciones a la frontera dependientes del tiempo, según sea el caso. Esto es, para cada componente del ciclo que sigue la olla, existirán condiciones a la frontera específicas.

El nodo que representa al material refractario, el cual estará en contacto ya sea, con un fluido gaseoso, con la atmósfera ó con el metal líquido, es el nodo 1; mientras que el nodo 27 representa la interacción entre la placa de acero y la atmósfera.

La expresión representativa de los fenómenos que ocurren sobre el nodo 1, así como la expresión que representa lo que ocurre sobre el nodo 27, ambas se reportan en el Apéndice III.

Se debe mencionar que dichas ecuaciones se generaron para satisfacer la evolución en estado inestable del fenómeno de transferencia de energía, a diferencia de las que reporta Hlinka<sup>[1]</sup> et al. Esto se muestra en el Apéndice IV.

La ecuación que representa el fenómeno de enfriamiento de la olla cuando se le retira el quemador y se traslada hacia la zona de vaciado, se reporta en el Apéndice V.

Además, la representación esquemática del enfriamiento que sufre la olla mediante un mecanismo de radiación, así como su respectiva analogía eléctrica, se muestran en la figura 3.



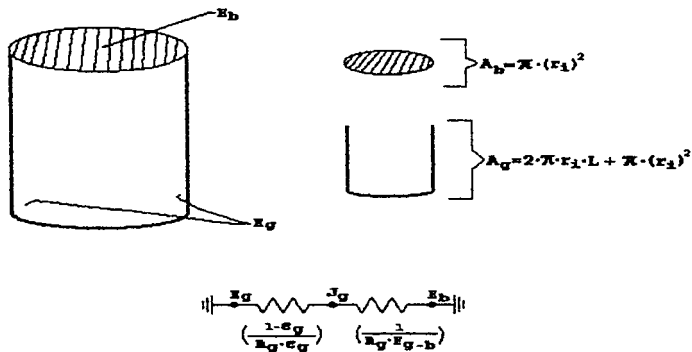


Figura 3. Representación del fenómeno radiante para las superficies de la olla y su analogía eléctrica.

En el análisis hecho a partir de la figura 3, se considera un sistema de estudio que posee básicamente 2 superficies, una de ellas está compuesta por las paredes y la otra, por la parte superior de la misma.

Considerando así, que la superficie 1 se comporta como un cuerpo gris y la superficie 2 como un cuerpo negro.

Se debe enfatizar además, que el análisis de ésta parte se realiza nuevamente sobre el nodo 1.

Ahora, la ecuación que representa al fenómeno de calentamiento de las paredes que constituyen la olla, debido al vaciado de acero líquido dentro de la misma a partir del primer nodo, se reporta en el Apéndice VI.

Una vez llena la olla, la transferencia de energía ocurre desde el nodo 1 y hacia afuera hasta el nodo 27, mediante un mecanismo de conducción. Además, el metal

líquido caliente, así como la capa de escoria remanente, quedan en contacto con el medio ambiente y ambos se enfrían mediante un mecanismo de radiación, esto ocurre mientras la olla se traslada hacia la zona de refinación (H.R.V.).

Por último, durante este traslado, mediante el modelo se predice la temperatura final con la cual el baño arriba al H.R.V. Las ecuaciones características para realizar el cálculo de esta temperatura, se reportan en el Apéndice VII.

Para cada una de las partes que componen al ciclo anteriormente descrito, se obtuvieron una serie de ecuaciones correspondientes a cada uno de los nodos establecidos en el sistema bajo estudio. Dichas ecuaciones se resuelven de manera consecutiva y el método empleado para ello requiere de un arreglo de estas ecuaciones en forma de una matriz tridiagonal.

Esta matriz se resuelve mediante el programa de cómputo, en función de las condiciones a la frontera iniciales que se introducen a este programa.

El arreglo general de todas las ecuaciones obtenidas, puede visualizarse en el Apéndice VIII.

Es importante enfatizar el hecho de saber que existen otras contribuciones energéticas muy importantes y que se involucran durante el proceso de elaboración y refinación de aceros en la planta, varias de estas contribuciones pueden ser las siguientes:

(1) La energía aportada por reacciones químicas que se llevan a cabo en el metal líquido, (2) la energía disipada por insuflación de argón y (3) la energía debida a la adición de flujes al baño, por mencionar sólo algunas.

Así, el programa sólo cuantifica las contribuciones descritas en el ciclo i a iv, ya que sólo se está analizando a la parte de transferencia de calor a través de las paredes de la olla.

Dicho ciclo se resuelve mediante un método numérico, introducido al programa de cómputo desarrollado en el Apéndice X.

## VI. RESULTADOS.

La historia térmica que experimenta el conjunto de materiales refractarios y la chapa de acero de una olla vacía, con capacidad para 40 T. la cual se precalentó con un quemador de combustóleo, se muestra en la figura 4.

Las dimensiones para una olla de dicha capacidad son:

- Longitud = 3.195 m.
- Radio interno = 1.11 m.

Los espesores y materiales que conforman a la olla son:

- Espesor 1 (E1) = 0.152 m. Magnesita-grafito (10% C).
- Espesor 2 (E2) = 0.0635 m. Magnesita pura (96% MgO).
- Espesor 3 (E3) = 0.0635 m. Silico-Aluminoso (40% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 54% SiO<sub>2</sub>).
- Espesor 4 (E4) = 0.028 m. Chapa de acero.

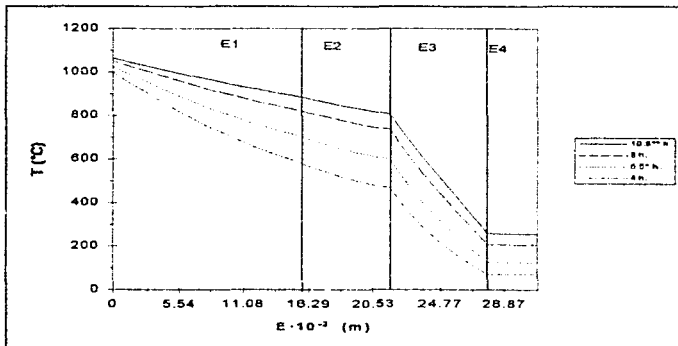


Figura 4. Perfiles térmicos calculados a diferentes tiempos de precalentamiento para una olla de 40 T.

En ésta figura se grafica a la temperatura contra el espesor de tales materiales, donde E1, E2, E3 y E4 son los espesores del refractario, del aislante 1, del aislante 2 y de la chapa de acero, respectivamente.

Las 4 curvas (i a iv) que se muestran en la figura 4, representan el precalentamiento al que se sujetó la olla durante los tiempos de 4 h, 5.5 h, 8 h y 10.3 h, respectivamente.

En éste gráfico, existen tres aspectos que son importantes de mencionar:

1°) La entrada de energía que recibe el nodo 1, el cual representa a la superficie interna de la olla y la cual se encuentra en contacto con los gases de combustión, recibe dicha energía de una manera discreta, es decir, conforme el tiempo avanza, la entrada de energía tiende a ser casi constante.

Adicionalmente, se aprecia en la figura 4 que, el cambio energético se vuelve menos perceptible conforme el tiempo de precalentamiento se incrementa.

2°) Los gradientes térmicos en los espesores 1, 2 y 3, evolucionan desde una manera no lineal hasta una lineal.

La linealidad se observa más definitivamente a partir del perfil iii que representa un precalentamiento de 8 horas y se aprecia aún mas en la curva iv hasta un punto tal, que entre la conducta de los gradientes en E1 y E2 es imperceptible.

3°) En apariencia, la chapa de acero (E4) no presenta resistencia a la transferencia de energía por el efecto conductivo. Esto se debe a que las variaciones de temperatura entre la parte interna y externa de la chapa, sólo experimentan un gradiente de 1 °C/cm.

Todos los perfiles graficados en la figura 4, que describen al precalentamiento, se obtuvieron a partir de las ecuaciones representativas. Dichas ecuaciones, para el caso de los nodos 1 y 27, se reportan en el Apéndice III.

Para el caso de las ecuaciones para los nodos 2 al 11, 13 al 17, 19 al 23 y del 25 y 26, se reportan en el Apéndice I.

Y por último, las ecuaciones para los nodos 12, 18 y 24, se reportan en el Apéndice II.

Por otra parte, en la figura 5 se muestra la respuesta térmica que sufre la misma olla de 40 T. de capacidad debido al efecto radiante. Este ciclo representa al enfriamiento, cuando se retira el quemador y la olla se traslada hacia la zona de vaciado.

En dichos perfiles se simula la evolución térmica que sufre la olla cuando han transcurrido 10 y 20 minutos de traslado.

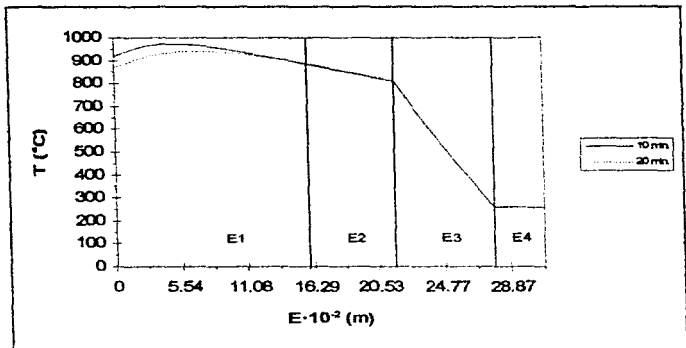


Figura 5. Perfiles térmicos que simulan el enfriamiento de una olla de 40 T., la cual se precalentó 10.3 horas.

Para la obtención de éstos gráficos, se utilizó una ecuación que describe al fenómeno radiante, sólo que ahora, la condición a la frontera en el nodo 1 es distinta a la utilizada para el caso del precalentamiento.

Esta variación, así como la nueva ecuación representativa del nodo 1, se reporta en el Apéndice V.

El efecto debido al contacto de metal líquido con el refractario y los otros materiales que componen a la olla de 40 T. de capacidad, se muestra en la figura 6.

Cuando el vaciado finaliza, se toma una medición de temperatura del líquido, a ésta temperatura se le llama: temperatura de vaciado del acero líquido (TVA). Además se debe mencionar, que dicha olla se enfrió debido a su traslado hacia la zona de vaciado.

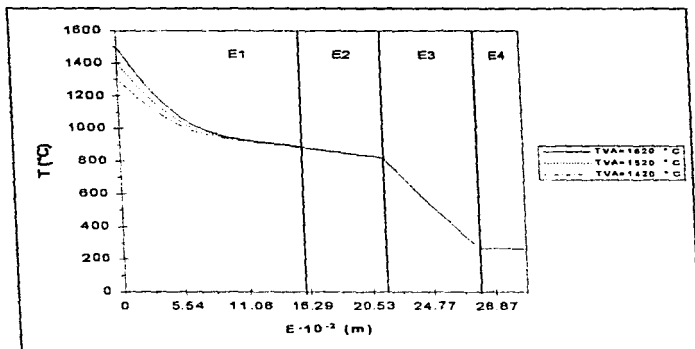


Figura 6. Perfiles térmicos que simulan el calentamiento del refractario de una olla de 40 T. a 3 distintas temperaturas de vaciado, la cual se precalentó 10.3 horas y luego se sujetó a un enfriamiento de 20 minutos.

En ésta figura se aprecia que para la olla ya mencionada de 40 T. de capacidad, que se precalentó 10.3 horas y en la que se muestran 3 diferentes temperaturas de vaciado (TVA). Los cambios substanciales que sufre la olla, se manifiestan sólo en el material refractario de la parte interna de la misma.

Por otro lado, dichos gráficos se obtuvieron a partir de las ecuaciones representativas que se utilizaron en el precalentamiento. Sin embargo, únicamente la ecuación para el nodo 1 debe modificarse. Dicha modificación se reporta en el Apéndice VI.

La descripción de las variaciones energéticas que experimenta cada etapa, se muestran en las figuras 7, 8 y 9, respectivamente.

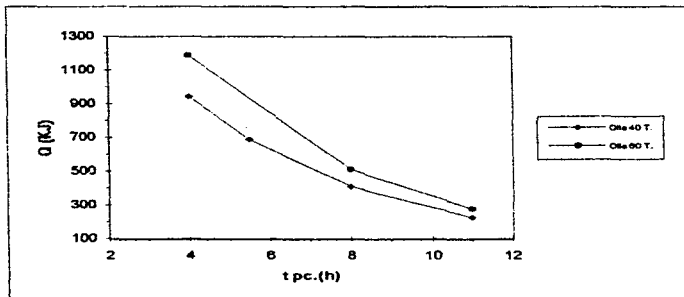


Figura 7. Variación del suministro de energía con respecto al tiempo, para ollas de 40 y 60 T., debido al quemado de combustóleo.

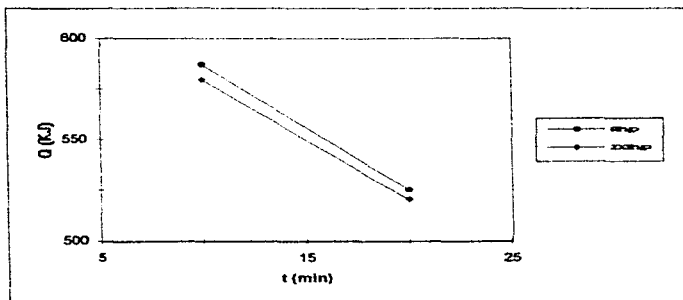


Figura 8. Cambio energético con respecto al tiempo, para una olla de 40 T., debido al enfriamiento de la misma.

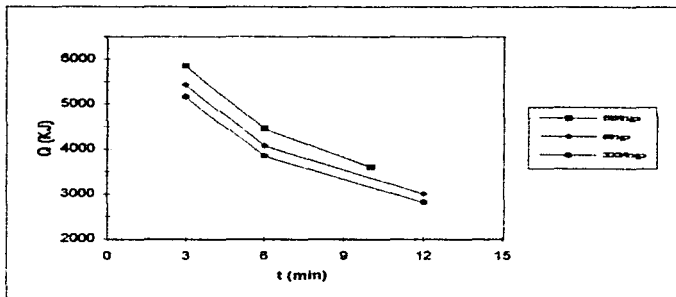


Figura 9. Variación del suministro de energía con respecto al tiempo, para una olla de 40 T., debido al vaciado de metal líquido.

En las figuras 7 y 9 se muestran respectivamente, las variaciones en el suministro de energía a las ollas, debido al quemado de combustible y al transferido por el metal líquido hacia las paredes que las componen.

Dichos gráficos se obtienen a partir de las ecuaciones reportadas en los Apéndices IV y VI.

En la figura 7 se graficó la variación energética para ollas de 40 y 60 T. de capacidad, mientras que, en la figura 9 se graficó la variación del suministro de energía cuando se utilizan 3 diferentes tiempos de precalentado, los cuales son: 5.5, 8 y 10.3 horas.

Adicionalmente, en la figura 8 se muestra como se sustrajo la energía desde el refractario cuando, una vez finalizado el precalentado de 8 y 10.3 horas; la olla sufre un enfriamiento debido a su traslado hacia la zona de vaciado.

Es importante mencionar que en éstos 3 últimos gráficos, no obstante que en 2 de ellos existe calentamiento, las variaciones energéticas decrecen con respecto al tiempo.



Otra característica importante de éstas curvas, como se espera, es que el intercambio energético más significativo es el debido a la interacción del metal líquido con el refractario, posteriormente y en orden decreciente, el enfriamiento y por último el precalentamiento.

Ahora, cuando la temperatura de vaciado de planta es 1620 °C, se observa en la figura 10, la variación de dicha temperatura conforme varía el tiempo de traslado de la olla hacia la zona de refinación vía H.R.V. Por otro lado, cabe aclarar que la olla no se llena en su totalidad.

Además, a partir de las ecuaciones reportadas en el Apéndice VII, se obtuvo la gráfica (a) que representa a los datos obtenidos con el modelo. La gráfica (b), se obtuvo a partir de mediciones en planta.

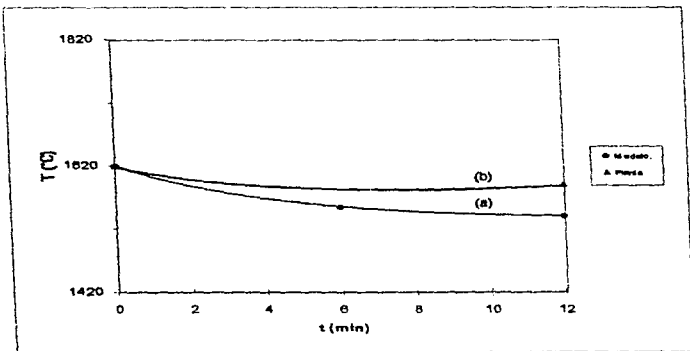


Figura 10. Variación en la temperatura del metal líquido debida al tiempo de traslado de la olla.

Para finalizar, se mencionan las otras contribuciones energéticas involucradas durante el proceso de refinación de acero en la planta de N.K.S.; y aunque dichas contribuciones no son introducidas al modelo matemático éstas pueden calcularse, mediante el uso de un balance térmico como el que se presenta a continuación:

$$Q_{vac} + Q_{Ar} + Q_{esc} + Q_{flues} = Q_{coque} + Q_{r,q} + Q_{HRV} + \eta$$

## VII. ANÁLISIS DE RESULTADOS.

La discusión de los resultados se hará en base a tres puntos generales, en donde, en el primero de ellos (I), se discute acerca de las condiciones a la frontera, dimensiones y fenómenos de transferencia que describen a cada una de las etapas en donde se involucra a la olla.

En el segundo punto (II), se hace un análisis en base a los resultados experimentales y los calculados mediante el modelo, para cada etapa del proceso.

En el tercer punto (III), se discute acerca de los parámetros que resultan ser más críticos en cada una de las etapas del proceso.

### (I). ANÁLISIS RESPECTO AL MODELO.

En éste primer punto, se analizará la manera en la cual se discretizó al fenómeno en general, así como la forma en la que se manejaron a los fenómenos de transferencia de energía, presentes en cada etapa. Todo lo referente al primer punto se discute en los incisos i) a iv).

i) Es claro que los mecanismos de transferencia de energía se ven altamente influenciados por la geometría del sistema. En este caso, en el que se consideró que dichos mecanismos ocurren sobre la dirección radial y a través de las paredes que recubren a la olla, se observa una simplificación geométrica del sistema.

ii) Respecto al modelo matemático, de hecho es un simulador de los procesos de transferencia de energía presentes en cada una de las etapas en donde se ve involucrada a la olla. Los mecanismos de transferencia de calor por convección, conducción y radiación se introducen al modelo a manera de condiciones a la frontera específicas. Así, el calentamiento desde el interior de la olla hacia las paredes por el efecto del quemado de los gases, se calcula mediante el uso de una ecuación. Y de manera similar, se hace uso de una ecuación representativa tanto para el caso del enfriamiento debido al traslado de la olla, como para el caso del calentamiento de la misma debido al vaciado de acero líquido a su interior. Además de que los 3 mecanismos de transferencia de energía se llevan a cabo simultáneamente. De aquí que, los cálculos que se realicen para este conjunto de mecanismos dependerán estrictamente de la validación de la condición a la frontera involucrada, contra los resultados experimentales tomados en la planta.

iii) Para el caso del enfriamiento de la olla, el mecanismo de transferencia de calor por radiación, predomina sobre el mecanismo de transferencia de calor por convección.

iv) Para el caso del calentamiento del material refractario debido al vaciado de metal líquido dentro de la olla, este se da primordialmente por convección. Sin embargo, dicho efecto entre el metal líquido y la superficie interna de la olla, ocurre la mayor parte del tiempo en condiciones de flujo laminar y convección natural, cuando el vaciado finaliza y el líquido se observa aparentemente sin movimiento. Se requirió de la ayuda de la ecuación reportada en Geiger y Poirier<sup>[1]</sup>, para así, poder calcular un coeficiente de transferencia de calor por convección para el acero líquido, bajo las condiciones antes mencionadas.

## (II). VALIDACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO.

En este punto, se hace un análisis comparativo sobre los resultados obtenidos mediante el uso del modelo matemático y los datos recabados de planta, toda esta discusión se hace para cada etapa del proceso y se desglosa en los incisos i) a iii).

i) El primer análisis de resultados se hace en base a la conducta del sistema gas de combustión/refractario, que se muestra en la figura 4. En esta figura se observan los distintos tiempos de precalentamiento a los que se sujetó la olla de 40 T.

En este gráfico se observa la tendencia en el comportamiento de las líneas graficadas, las cuales a tiempos "cortos" de precalentamiento tienen una variación no lineal y a medida que se incrementa el tiempo de precalentamiento, la variación se hace lineal. Esto se debe a que el sistema gas de combustión/refractario alcanza un estado quasi-estable.

En este mismo gráfico, se aprecia que en la medida en que transcurre el tiempo, la  $\Delta T$  entre el gas de combustión y la pared refractaria, se va haciendo cada vez menor. Es por ello que, después de 8 horas de precalentamiento, la variación en la temperatura del nodo mas interno de la olla (nodo 1), se hace casi imperceptible.

De aquí que, se pueda observar que la evolución en la temperatura del refractario y en los demás materiales que recubren a la olla, muestren "conductas" casi similares entre 8 y 10 horas de precalentamiento; y por lo tanto, se deduce que, el precalentar a la olla por un periodo mayor a 10 horas, es innecesario.

Cabe mencionar, que la temperatura del nodo 1 cuando se precalentó a la olla 10.3 horas, según la predicción del modelo, es de 1063.6 °C. Mientras que la temperatura tomada en planta a una altura media de la olla, sobre la pared refractaria, es de 1030 °C máximo. Predicción que resulta ser altamente congruente.

ii) Para el caso en el que se analiza el enfriamiento de la olla, mediante un mecanismo de radiación y en donde se involucra al sistema aire atmosférico/refractario caliente, se observa su comportamiento en la figura 5.

En este gráfico, se nota una disminución en la temperatura del nodo 1; dicha disminución se origina debido a que la olla se traslada desde la zona de precalentamiento, hasta la zona de vaciado del horno eléctrico de arco sin ser cubierta.

Como se observa, no obstante que el tiempo de traslado es corto, la  $\Delta T$  para esta etapa es mucho más elevada que para el caso del precalentamiento.

Esto se debe, a que el cambio energético entre una etapa y otra es abrupto; es decir, al terminar el precalentamiento de la olla y una vez retirado el quemador, el refractario caliente, queda en contacto con la atmósfera, cuya temperatura es aproximadamente 30 °C.

La medición tomada en planta de la temperatura de la pared refractaria, se realizó un instante antes de ser vaciado el metal líquido dentro de la olla, de la misma manera en que fue tomada la temperatura de precalentado, es decir, a una altura media de la olla. Dicha temperatura fue de 850 °C máximo; mientras que, la temperatura calculada por el modelo para ese instante fue de 267.9 °C.

iii) Una vez finalizado el vaciado, la olla se traslada hacia la zona donde se realiza la refinación con vacío. Esta etapa del proceso se simuló mediante el modelo, tomando en cuenta el calentamiento que sufre la pared refractaria debido a su contacto con el metal líquido. Los perfiles térmicos obtenidos se muestran en la figura 6.

El dato inicial que se tomó en planta para hacer dicha simulación, fue el valor de la temperatura (TVA), al finalizar el vaciado de acero líquido proveniente del horno eléctrico de arco. Para la colada 97-292, la TVA fue de 1620 °C.

Adicionalmente, cuando la olla se traslada hacia la zona donde se encuentra el H.R.V., el baño líquido se enfría, ya que como se mencionó anteriormente, la olla no se tapa.

Por lo tanto, el metal interactúa con la atmósfera y con las paredes de la olla, mediante los mecanismos de convección y conducción, respectivamente. Este enfriamiento que sufre el líquido, también se simula mediante el uso del modelo.

Dicho modelo predice la temperatura con la cual el metal líquido llega a la zona donde se encuentra el H.R.V.

Para el caso de la colada 97-292, la TVA es 1620 °C y la cantidad de metal líquido es de 40 T. Así, la temperatura (tomada en planta mediante el uso de una lanza y a una altura media del volumen que ocupa el líquido) con la cual arriba el

baño líquido es de 1590 °C, mientras que, el modelo predice una temperatura de llegada de 1539.2 °C.

Esta predicción y su comparación con los datos de planta, se pueden apreciar en la figura 10.

Cabe mencionar, que las predicciones hechas por el modelo, se encuentran bastante cercanas con la realidad, todo esto bajo condiciones óptimas de trabajo en planta.

### (III).ANÁLISIS RESPECTO DE LOS PARÁMETROS CRÍTICOS INVOLUCRADOS EN EL PROCESO.

En este punto, se discutirá acerca de la manera en que se dan los cambios energéticos en cada una de las etapas del proceso y los que resultan ser más críticos.

Es importante enfatizar, que existen condiciones que promueven más fuertemente a la transferencia de energía, desde el metal líquido y hacia las paredes del refractario .

Una de ellas, es el vaciado de metal líquido desde el horno eléctrico de arco dentro de la olla, es ahí, donde se promueve un gran efecto convectivo, debido a la turbulencia provocada durante el vaciado mismo, pero para efectos del modelo, como se expreso en el punto iv de la parte (I), no se tomó en cuenta.

Para el caso de las etapas donde se produce calentamiento, el comportamiento de los gráficos 7 y 9 es similar, es decir, la variación en el cambio energético con respecto al tiempo, se da de manera continua y tiende a ser asintótica a medida que el tiempo se incrementa. Este patrón se debe a que el gradiente térmico entre estos puntos disminuye a medida que avanza el tiempo.

Por otra parte, para el caso del enfriamiento, el comportamiento de ésta etapa muestra un cambio más notorio que las otras dos, debido a que se ven involucrados de manera conjunta dos efectos: convectivo y radiante. Dicho comportamiento energético se muestra en el gráfico 8.

### VIII. CONCLUSIONES.

De acuerdo con lo que se discutió anteriormente, éste trabajo se puede resumir en las siguientes conclusiones:

1) No obstante la simplicidad con la que se elaboró el modelo matemático, tanto por las consideraciones geométricas, así como por las condiciones a la frontera; este modelo al evaluarse a la luz de los fenómenos de transporte involucrados en dicho proceso, resulta tener un alto grado de autoconsistencia y confiabilidad.

2) El modelo simula de manera muy congruente a cada una de los fenómenos de transferencia de energía, que se ven involucrados en cada etapa en donde se utilizó a la olla, ésto se visualiza en los gráficos reportados en los resultados.

Una buena manera de observar la confiabilidad de la simulación que se realizó mediante el uso del modelo, es mediante la comparación entre las predicciones y mediciones de la temperatura la que se presentan en la siguiente tabla:

etapa	T(1) <sub>planta</sub>	T(1) <sub>modelo</sub>	TFA <sub>planta</sub>	TFA <sub>modelo</sub>	ΔT
precalentamiento	1030 °C	1063.6 °C	-----	-----	13.6
enfriamiento	850 °C	867.8 °C	-----	-----	17.8
calentamiento	-----	1504.4 °C	1590 °C	1539.2 °C	50.8

TABLA 1. Comparación entre las temperaturas tomadas en planta y las predichas mediante el modelo.

3) Del análisis de cada uno de los fenómenos de transferencia de energía, se observa que, se debe reducir el efecto radiante en la parte del proceso donde se presenta el enfriamiento de la olla. Ya que como se observó en la figura 8, la variación energética más drástica, se presenta en ésta etapa. El usar una tapa sobre la olla durante su traslado, es una alternativa de solución. Esto, con la finalidad de evitar una caída térmica muy elevada de la pared refractaria interna de la olla.

## BIBLIOGRAFÍA.

1. A.Gastón y M.Medina, "Thermal Modeling of Casting Ladles: High-Alumina, Dolomite, Magnesite and Magnesia-Graphite Refractories". Pags.29-35. Iron and Steelmaker Magazine. 1996.
2. J.W.Hlinka, A.W.Cramb y D.H.Bright, "A Model for Predicting the Thermal History of a Ladle of Steel". Pags.35-47. Bethlehem Steel Corporation Report. 1986.
3. B.Carnahan, H.A.Luter y J.O.Wilkes, "Applied Numerical Methods". Pags.441-446. Wiley and Sons. 1970.
4. J.A.Adams y D.E.Rogers, "Computer-Aided Heat Transfer Analysis". Pags.29-34. Mc.Graw-Hill Co. 1978.
5. B.H.Geiger y D.R.Poirier, "Transport Phenomena in Metallurgy". Pags.317-321. Addison-Wesley Pub.Co. 1973.
6. F.Kreith y R.Black, "La transmisión de calor. Principios fundamentales ". Pags.224-229. Alambra S.A. 1983.
7. J.P.Holman, "Transferencia de Calor". Pags.105-142, 243-259, 277-326, 492, 498 y 504. C.E.C.S.A. 1984.
8. S.C.Chapra y R.F.Canale, "Metodos Numéricos para Ingenieros". Pags.736-741. Mc.Graw-Hill Co. 1988.
9. H.A.Fine y G.H.Geiger, "Handbook on Material and Energy Calculations in Metallurgical Processes". Pags.247-264, 290, 302. The Metallurgical Society of AIME. 1980.
10. J.García Sánchez, "Estudio de la Solidificación de Piezas con Geometría Rectangular en Moldes de Arena mediante un Modelo Matemático", Tesis de Licenciatura. U.N.A.M. 1995.
11. O.Kubaschewski, "Metallurgical Thermochemistry". Pag.182. Pergamon Press. 1979.
12. J.Apraiz Barreiro, "Fabricación de Hierro, Acero y Fundiciones". Pags.373 y 539. Tomo II. URMO S.A. 1984.



13. R. Alberny y A. Leclerq, "Heat losses from liquid steel in the ladle and in the tundish of a continuous-casting installation". Pags. 151-156. Mathematical Process Models in Iron and Steelmaking, Metal Society. 1975.
14. R. Olvera Correa, "Control de forma de las inclusiones en un acero tipo S-5". Tesis de Licenciatura. U.N.A.M. 1996.
15. Comunicación interna. Grupo Industrial N.K.S., S.A. de C.V.

## APÉNDICE I.

### ECUACIÓN GENERAL PARA NODOS NO INTERCARA.

Para conocer la variación de la temperatura con respecto al tiempo para los nodos 2 al 11, 13 al 17, 19 al 23 y 25 y 26; se hace el un análisis de transferencia de calor por conducción en estado inestable a través de los 4 materiales que componen la olla. Así, se obtiene una ecuación general que representará a los nodos que no se encuentran en intercara. Y esta es la siguiente:

$$T_i^{t_1} = T_i^{t_1-1} \left[ 1 - \left( \frac{a_i + b_i}{d_i} \right) \right] + T_{i-1}^{t_1-1} \left( \frac{a_i}{d_i} \right) + T_{i+1}^{t_1-1} \left( \frac{b_i}{d_i} \right)$$

Ecuación V.1.

Donde los valores de las constantes  $a_i$ ,  $b_i$  y  $d_i$  son los siguientes:

$$a_i = -2\Delta r_m \left[ r_i + \left( i + \frac{1}{2} \right) \cdot \Delta r_m \right] \quad ; \quad b_i = -2\Delta r_m \left[ r_i + \left( i - \frac{1}{2} \right) \cdot \Delta r_m \right] \quad y$$

$$d_i = \left( \frac{1}{F0m} \right) \left( \left[ r_i + \left( i + \frac{1}{2} \right) \cdot \Delta r_m \right]^2 - \left[ r_i + \left( i - \frac{1}{2} \right) \cdot \Delta r_m \right]^2 \right)$$

APÉNDICE II.

ECUACIÓN GENERAL PARA LOS NODOS INTERNOS.

Para los nodos 12, 18 y 24 llamados "intercaras" y que son considerados en modelo como internos, se obtuvo la siguiente ecuación representativa:

$$T_i^i = T_{i+1}^{i+1} \left[ 1 - \left( \frac{a_{in} + b_{in}}{d_{in}} \right) \right] + \left( \frac{a_{in}}{d_{in}} \right) T_{i+1}^{i+1} + \left( \frac{b_{in}}{d_{in}} \right) T_{i+1}^{i+1}$$

Ecuación V.2.

donde:

$$\overline{\rho C p} = [(fV m_{i-1} \times \rho m_{i-1}) + (fV m_{i+1} \times \rho m_{i+1})] * \\ [(fM m_{i-1} \times C p m_{i-1}) + (fM m_{i+1} \times C p m_{i+1})]$$

Y las constantes  $a_{in}$ ,  $b_{in}$  y  $d_{in}$  son específicas para cada nodo interno y son las siguientes:

$$a_{12} = -\kappa_1 \cdot \Delta r_2 \cdot [D_1 + 2E_1 + \Delta r_2] \quad ; \quad b_{12} = - \left[ \frac{(\Delta r_2)^2}{\Delta r_1} \right] \cdot [D_1 + 2E_1 - \Delta r_1] \quad y$$

$$d_{12} = \left( \frac{1}{FOP1} \right) \cdot \left[ \left( r_1 + E_1 + \frac{\Delta r_2}{2} \right)^2 - \left( r_1 + E_1 - \frac{\Delta r_2}{2} \right)^2 \right] \quad ;$$

$$a_{18} = -\kappa_2 \cdot \Delta r_3 \cdot [D_1 + 2(E_1 + E_2) + \Delta r_3] \quad ; \quad b_{18} = - \left[ \frac{(\Delta r_3)^2}{\Delta r_2} \right] \cdot [D_1 + 2(E_1 + E_2) - \Delta r_2] \quad y$$

$$d_{18} = \left( \frac{1}{FOP2} \right) \cdot \left[ \left( r_1 + E_1 + E_2 + \frac{\Delta r_3}{2} \right)^2 - \left( r_1 + E_1 + E_2 - \frac{\Delta r_3}{2} \right)^2 \right] \quad ;$$

$$a_{24} = -k_3 \cdot \Delta r_4 \cdot [D_1 + 2(E_1 + E_2 + E_3) + \Delta r_4] ; \quad b_{24} = - \left[ \frac{(\Delta r_4)^2}{\Delta r_3} \right] \cdot [D_1 + 2(E_1 + E_2 + E_3) - \Delta r_3] \quad y$$

$$d_{24} = \left( \frac{1}{FOP3} \right) \cdot \left[ \left( r_1 + E_1 + E_2 + E_3 + \frac{\Delta r_4}{2} \right)^2 - \left( r_1 + E_1 + E_2 + E_3 - \frac{\Delta r_4}{2} \right)^2 \right]$$

APÉNDICE III.

ECUACIÓN GENERAL PARA LOS NODOS EXTERNOS.

Para los nodos 1 y 27 ubicados en "intercaras", los cuales son considerados por el modelo como nodos externos, se obtuvieron las siguientes ecuaciones representativas:

$$b_i T_i^t - \frac{Q_L \cdot A_i \cdot \Delta r_i^2}{\kappa_R \cdot \pi \cdot L} = (b_i - a_i) T_i^{t+1} + a_i T_{i+1}^{t+1}$$

Ecuación V.3.

$$b_i T_i^t - \frac{Q_E \cdot A_E \cdot \Delta r_d^2}{\kappa_C \cdot \pi \cdot L} = (b_i - a_i) T_i^{t+1} + a_i T_{i+1}^{t+1}$$

Ecuación V.4.

donde  $i=1$  para la ecuación V.3 e  $i=27$  para la ecuación V.4.

Por lo tanto, para los nodos externos 1 y 27, se tienen las siguientes constantes:

$$a_1 = -\Delta r_1 \cdot (D_1 + \Delta r_1) \quad \text{y} \quad b_1 = \left( \frac{1}{F0R} \right) \cdot \left[ \left( r_1 + \frac{\Delta r_1}{2} \right)^2 - (r_1)^2 \right] ;$$

$$a_{27} = -\Delta r_1 \cdot [D_1 + 2(E_1 + E_2 + E_3) + 5\Delta r_4] \quad \text{y}$$

$$b_{27} = \left( \frac{1}{F0C} \right) \cdot \left[ (r_c)^2 - \left( r_1 + E_1 + E_2 + E_3 - \frac{5}{2} \Delta r_4 \right)^2 \right]$$

APÉNDICE III.

ECUACIÓN GENERAL PARA LOS NODOS EXTERNOS.

Para los nodos 1 y 27 ubicados en "intercaras", los cuales son considerados por el modelo como nodos externos, se obtuvieron las siguientes ecuaciones representativas:

$$b_i T_i^i - \frac{Q_R \cdot A_R \cdot \Delta r_i^2}{\kappa_R \cdot \pi \cdot L} = (b_i - a_i) T_i^{i+1} + a_i T_{i+1}^{i+1}$$

Ecuación V.3.

$$b_i T_i^i - \frac{Q_C \cdot A_C \cdot \Delta r_i^2}{\kappa_C \cdot \pi \cdot L} = (b_i - a_i) T_i^{i+1} + a_i T_{i+1}^{i+1}$$

Ecuación V.4.

donde  $i=1$  para la ecuación V.3 e  $i=27$  para la ecuación V.4.

Por lo tanto, para los nodos externos 1 y 27, se tienen las siguientes constantes:

$$a_1 = -\Delta r_1 \cdot (D_1 + \Delta r_1) \quad \text{y} \quad b_1 = \left( \frac{1}{FOR} \right) \cdot \left[ \left( r_1 + \frac{\Delta r_1}{2} \right)^2 - (r_1)^2 \right] ;$$

$$a_{27} = -\Delta r_4 \cdot [D_1 + 2(E_1 + E_2 + E_3) + 5\Delta r_4] \quad \text{y}$$

$$b_{27} = \left( \frac{1}{FOC} \right) \cdot \left[ (r_c)^2 - \left( r_1 + E_1 + E_2 + E_3 - \frac{5}{2} \Delta r_4 \right)^2 \right]$$

#### APÉNDICE IV.

##### DESARROLLO DE LAS ECUACIONES GENERALES PARA LAS FRONTERAS EXTERNAS.

Este tipo de ecuaciones fueron elaboradas a partir de las expresiones obtenidas por Hlinka<sup>[1]</sup>, et al.

Dichas ecuaciones generales, se refieren a cada una de las fronteras externas.

Debido a que ambas fronteras presentan similitud en cuanto a su tratamiento teórico, se utilizó una ecuación que contabiliza los fenómenos de transferencia de energía presentes en cada frontera<sup>[1]</sup>, obteniéndose así la siguiente expresión:

$$Q_{II} = 0.3 * [TICF - T(1)]^{1.25} + [1.73 * 10^{-9} * E * F * (TICF + 460)^4 - (T(1) + 460)^4]$$

Ecuación V.5.

La ecuación V.5 se utiliza para la parte que se encuentra expuesta directamente con el gas, ó con la atmósfera, ó con el acero líquido; o sea, representa la ecuación para el nodo 1.

Una ecuación similar se utiliza para el nodo 27, el cual está expuesto al medio ambiente, obteniéndose la siguiente expresión:

$$Q_{II} = 0.3 * [T(27) - TAMF]^{1.25} + [1.73 * 10^{-9} * E * F * (TAMF + 460)^4 - (T(27) + 460)^4]$$

Ecuación V.6.

Donde a E y F se les asignan los valores de 0.8 y 1, respectivamente según Hlinka<sup>[1]</sup>, et al.

Por otra parte, TICF=2012 °F y TAMF=77 °F, con la condición inicial:

T=77 °F, al t=0 .

$Q_{II}$  de la ecuación V.5, al igual que  $Q_{EE}$  de la ecuación V.6, se encuentran en unidades británicas, por lo que, tanto a la expresión obtenida de  $Q_{II}$  como a la de  $Q_{EE}$  se les multiplica por un factor de conversión para obtener así, el valor del flux de calor en unidades del S.I., obteniéndose las siguientes ecuaciones:

$$Q_I = Q_{II} \cdot 7.5346 \times 10^{-5}$$

Ecuación V.5.1.

$$Q_E = Q_{EE} \cdot 7.5346 \times 10^{-5}$$

Ecuación V.6.1.



APÉNDICE V.

ECUACIÓN GENERAL QUE DESCRIBE EL ENFRIAMIENTO.

Para obtener la evolución de los perfiles térmicos que describen al enfriamiento a partir del nodo 1, se utiliza una nueva ecuación, deducida del análisis hecho sobre la figura 3. Aquí, la condición de frontera varía, es decir, la temperatura del nodo 1 cuando se retira el quemador, posee otro valor.

Para tal circunstancia, la ecuación es la siguiente:

$$b_1 T_1^i - \frac{(Q_1) \cdot (\Delta r_1)^2}{\kappa_1 \cdot \pi \cdot L} = (b_1 - a_1) T_1^{i+1} + a_1 T_2^{i+1}$$

Ecuación V.7.

Para predecir el enfriamiento, se asume:

$$Q_1 = \left( Q_R / A_1 \right) \cdot 7.5346 \times 10^{-5}$$

Donde:

$$Q_R = \left\{ \frac{[1.73E-9 \cdot (T(1)^4 - TAM^4)]}{\left[ \left( \frac{1}{A_1 \cdot F_{12}} \right) + \left( \frac{1 - E_R}{A_1 \cdot E_R} \right) \right]} \right\} + [5 \cdot A_1 \cdot (T(1) - TAM)]$$

APÉNDICE VI.

ECUACIÓN GENERAL QUE DESCRIBE AL CALENTAMIENTO DEBIDO AL  
VACIADO DE METAL LÍQUIDO.

Ahora, para describir éste calentamiento, se realiza un análisis de transferencia de calor similar al precalentamiento, esto es, el análisis se hace nuevamente sobre el nodo 1.

De igual manera que en el enfriamiento, la condición en ésta frontera varía, o sea, que la temperatura del nodo 1 cuando se inicia el calentamiento, será la última temperatura que se obtiene en el enfriamiento, un instante antes de vaciar el metal líquido.

Por lo tanto, se obtiene una ecuación general característica para el primer nodo, la cual es:

$$b_i T_i^t - \frac{Q_i \cdot A_i \cdot \Delta r_i^2}{\kappa_R \cdot \pi \cdot L} = (b_i - a_i) T_i^{t+1} + a_i T_{i+1}^{t+1}$$

Ecuación V.8.

Note que  $Q_i$  se obtiene a partir de la siguiente ecuación:

$$Q_{ii} = 0.3 \cdot [T_{VAF} - T(1)]^{1.25} + [173 \cdot 10^{-9} \cdot E \cdot F \cdot (T_{VAF} + 460)^4 - (T(1) + 460)^4]$$

Ecuación V.9.

Además,  $T_{VAF}$  es la temperatura del metal líquido en °F, una vez terminado el vaciado. A  $Q_i$  se le multiplica por el factor de conversión descrito anteriormente.

APÉNDICE VII.

PREDICCIÓN DE LA TEMPERATURA FINAL DEL ACERO LÍQUIDO (TFA).

Para predecir la variación que sufre la temperatura de vaciado del metal líquido (TVA), con respecto al tiempo, tenemos que hacer uso de las siguientes ecuaciones:

$$Q_c = H A C \cdot A_i \cdot \left\{ \left( \frac{[T(1) - 32]}{1.8} \right) - TVA \right\}$$

Ecuación V.10.

$$TFA = \left[ \frac{Q_c}{(m \text{ ag} \cdot cc)} \right] + TVA$$

Ecuación V.11.

Aquí, en la ecuación V.11, se introducen el valor inicial de TVA (°C), además de los parámetros conocidos Qc, masa y Cp del líquido.

Pero conforme avanza el tiempo se deberá conocer una nueva temperatura, la cual ahora será denominada como TFA (°C). Y ésta a su vez, volverá a introducirse en la ecuación V.10 como una nueva TVA mediante un ciclo iterativo, que está integrado en el programa de cómputo.

Por lo tanto, con la ecuación V.11 se podrá predecir la temperatura final (TFA), la cual es la temperatura con la que arriba el acero líquido a la zona del procesamiento mediante vacío. Lo cual es una función del tiempo de traslado de la olla, desde la zona de vaciado del horno eléctrico de arco.

## APÉNDICE VII.

### ARREGLO DE ECUACIONES.

Todas las ecuaciones deducidas, se agrupan en forma de una matriz tridiagonal<sup>3,4</sup> para poder resolverse mediante el programa de cómputo.

Una matriz tridiagonal se ejemplifica de la siguiente manera:

$$\begin{array}{rcl}
 b_1 v_1 + c_1 v_2 & & = d_1 \\
 a_2 v_1 + b_2 v_2 + c_2 v_3 & & = d_2 \\
 a_3 v_2 + b_3 v_3 + c_3 v_4 & & = d_3 \\
 & \dots\dots\dots & \\
 & a_i v_{i-1} + b_i v_i + c_i v_{i+1} & = d_i \\
 & \dots\dots\dots & \\
 & a_{N-1} v_{N-2} + b_{N-1} v_{N-1} + c_{N-1} v_N & = d_{N-1} \\
 & a_N v_{N-1} + b_N v_N & = d_N
 \end{array}$$

donde:

a, b, c y d son los coeficientes de los vectores definidos en el arreglo matricial.

v es el vector que contiene la solución dada por el programa de cómputo.

i es el número que hace referencia al nodo a analizar, tal que: i=2, 3, ... N.

APÉNDICE IX.  
PROPIEDADES Y COSTOS.

$\rho$ [Kg/m <sup>3</sup> ]	$C_p$ [J/Kg·°C]	$K$ [W/m·°C]	Nombre	ref.
7830	450	----	Acero líquido	[1]
2950	1212	4.0	Magnesita (96% MgO)	[1]
2950	1212	7.0	Magnesia-Grafito (10% C)	[1]
2146	1046.5	0.46	Silico-Aluminoso (40% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> y 54% SiO <sub>2</sub> )	[9]
7850	690.7	31	Chapa de acero	[7]

Tabla 2. Propiedades termofísicas del acero y de los materiales que recubren a la olla.

Olla	Periodo de reparación	costo de reparación
40 T.	cada 30 coladas	\$ 75,000
60 T.	cada 35 coladas	\$ 95,000

Tabla 3. Periodos y costos de reparación aproximados para las ollas de N.K.S., S.A. de C.V.

APÉNDICE X.  
PROGRAMA DE CÓMPUTO.

```

100 /
200 /
300 /
400 /
500 CLS
600 OPEN "TEMPS" FOR OUTPUT AS #1
700 REM ... "PROGRAMA DE COMPUTO PARA LA PREDICCIÓN DE LAS PERDIDAS DE CALOR
800 REM ... EN EL HORNO OLLA DE N.K.S. EN LAZARO CARDENAS, MICHOACAN"
900 REM ... "DIMENSIONAMIENTO DE VARIABLES"
100 DIM T(27), TS(27), V(27)
1100 DIM A(27), B(27), D(27), E(27)
1200 DIM AMTD(27), BMTD(27), CMTD(27), DMTD(27)
1300 DIM BETA(27), GAMMA(27)
1400 REM ... INTRODUCCION DE TODOS LOS PARAMETROS REFERENTES A LA OLLA ...
1500 KR = .01672; DR = 2.95; CR = .2899
1600 KA1 = .00956; DA1 = 2.95; CA1 = .2899
1700 KA2 = .0011; DA2 = 2.146; CA2 = .25
1800 KC = .08; DC = 7.85; CC = .165
1900 K1 = KA1 / KR
2000 K2 = KA2 / KA1
2100 K3 = KC / KA2
2200 E = .8; F = 1; ER = .5; F12 = .1482
2300 P1 = 3.14159; CML = .1075; S = 1.354E-12; HAC = .14
2400 VEGES = 0
2500 NDT = 0
2600 INPUT "TECLEE EL RADIO INTERNO DE LA OLLA (cm) = "; RI
2700 INPUT "TECLEE LA LONGITUD DE LA OLLA (cm) = "; L
2800 INPUT "TECLEE EL INTERVALO DE TIEMPO PARA REALIZAR LOS CALCULOS = "; DT
2900 INPUT "TECLEE LA TEMPERATURA (G.CELSIUS) QUE POSÉE EL ACERO LIQUIDO AL FINA
LIZAR EL VACIADO = "; TVA
3000 INPUT "TECLEE TEMPERATURA MAXIMA DE CALENTAMIENTO (C/COMBUSTOLEO) EN G.CELS
IUS = "; TIC
3100 INPUT "TECLEE LA TEMPERATURA AMBIENTE EN GRADOS CELSIUS = "; TAMC
3200 INPUT "TECLEE EL NUMERO DE TONELADAS QUE RECIBE LA OLLA DEBIDO AL VACIADO D
E ACERO LIQUIDO QUE PROVIENE DEL H.E.A. = "; MA
3300 TICF = (TIC * 1.8) + 32
3400 TAM = (TAMC * 1.8) + 32
3500 TVAF = (TVA * 1.8) + 32
3600 MAG = MA * 1000000
3700 INPUT "ESPESOR DEL REFRACTARIO (cm) = "; E1
3800 INPUT "ESPESOR DEL AISLANTE 1 (cm) = "; E2
3900 INPUT "ESPESOR DEL AISLANTE 2 (cm) = "; E3
4000 INPUT "ESPESOR DE LA CHAPA DE ACERO (cm) = "; E4
4100 REM ... SECCION DE ALMACENAMIENTO DE DATOS ...
4200 BS = "SI"
4300 CS = "NO"
4400 INPUT "DESEAS GUARDAR LOS DATOS DE TEMPERATURA OBTENIDOS (SI/NO) = "; GS
4500 IF GS <> CS THEN 4600 ELSE 4800
4600 IF GS = BS THEN 4700 ELSE 4400
4700 REM ...
4800 FOR I = 1 TO 27
4900 T2(I) = TAM / 'G.FAHRENHEIT
5000 T(I) = 0 / 'G.FAHRENHEIT
5100 NEXT I
5200 NN1 = 12
5300 NN2 = 7
5400 NN3 = 7
5500 NN4 = 4
5600 NTN = 27
5700 DR1 = E1 / (NN1 - 1)

```

**ESTA TESIS NO DEBE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA**

```

5900 DR2 = E2 / (NN2 - 1)
5900 DR3 = E3 / (NN3 - 1)
6000 DR4 = E4 / (NN4 - 1)
6100 RE = RI + E1 + E2 + E3 + E4
6200 DI = 2 * RI
6300 AI = 2 * PI * RI * L
6400 AE = 2 * PI * RE * L
6500 A1 = (2 * PI * RI * L + PI * RI ^ 2) / (30.48 ^ 2)
6600 AS1 = 2 * PI * RI * L + PI * RI ^ 2
6700 FVR12 = ((RI + E1) ^ 2 - (RI + E1 - DR1 / 2) ^ 2) / (((RI + E1 + DR2 / 2) ^ 2 - (RI + E1 - DR1 / 2) ^ 2)
6800 FVA12 = ((RI + E1 + DR2 / 2) ^ 2 - (RI + E1) ^ 2) / (((RI + E1 + DR2 / 2) ^ 2 - (RI + E1 - DR1 / 2) ^ 2)
6900 FVA18 = ((RI + E1 + E2) ^ 2 - (RI + E1 + E2 - DR2 / 2) ^ 2) / (((RI + E1 + E2 + DR3 / 2) ^ 2 - (RI + E1 + E2 - DR2 / 2) ^ 2)
7000 FVS18 = ((RI + E1 + E2 + DR3 / 2) ^ 2 - (RI + E1 + E2) ^ 2) / (((RI + E1 + E2 + DR3 / 2) ^ 2 - (RI + E1 + E2 - DR2 / 2) ^ 2)
7100 FVS24 = ((RI + E1 + E2 + E3) ^ 2 - (RI + E1 + E2 + E3 - DR3 / 2) ^ 2) / (((RI + E1 + E2 + E3 + DR4 / 2) ^ 2 - (RI + E1 + E2 + E3 - DR3 / 2) ^ 2)
7200 FVC24 = ((RI + E1 + E2 + E3 + DR4 / 2) ^ 2 - (RI + E1 + E2 + E3) ^ 2) / (((RI + E1 + E2 + E3 + DR4 / 2) ^ 2 - (RI + E1 + E2 + E3 - DR3 / 2) ^ 2)
7300 FMR12 = (FVR12 * DR) / ((FVR12 * DR) + (FVA12 * DA1))
7400 FMA12 = (FVA12 * DA1) / ((FVR12 * DR) + (FVA12 * DA1))
7500 FMA16 = (FVA18 * DA1) / ((FVA16 * DA1) + (FVS18 * DA2))
7600 FMS18 = (FVS18 * DA2) / ((FVA18 * DA1) + (FVS18 * DA2))
7700 FMS24 = (FVS24 * DA2) / ((FVS24 * DA2) + (FVC24 * DC))
7800 FMC24 = (FVC24 * DC) / ((FVS24 * DA2) + (FVC24 * DC))
7900 RCP1 = ((FVA12 * DA1 + FVR12 * DR) * (FMA12 * CA1 + FMR12 * CR))
8000 RCP2 = ((FVA18 * DA1 + FVS18 * DA2) * (FMA18 * CA1 + FMS18 * CA2))
8100 RCP3 = ((FVS24 * DA2 + FVC24 * DC) * (FMS24 * CA2 + FMC24 * CC))
8200 AP1 = KR / RCP1
8300 AP2 = KA1 / RCP2
8400 AP3 = KA2 / RCP3
8500 AR = KR / (DR * CR)
8600 AA = KA1 / (DA1 * CA1)
8700 AS = KA2 / (DA2 * CA2)
8800 AC = KC / (DC * CC)
8900 FOR = (AR * DT) / (DR1 ^ 2)
9000 FOA = (AA * DT) / (DR2 ^ 2)
9100 FOS = (AS * DT) / (DR3 ^ 2)
9200 FOC = (AC * DT) / (DR4 ^ 2)
9300 FOP1 = (AP1 * DT) / (DR2 ^ 2)
9400 FOP2 = (AP2 * DT) / (DR3 ^ 2)
9500 FOP3 = (AP3 * DT) / (DR4 ^ 2)
9600 BI = (HAC * DR1) / KR
9700 VECES = VECES + 1
9800 FOR I = 1 TO 27
9900 T(I) = T2(I)
10000 NEXT I
10100 IF NDT <> 0 THEN 10600
10200 PRINT "DISTRIBUCION INICIAL"
10300 FOR I = 1 TO 27
10400 PRINT T(I)
10500 NEXT I
10600 IF (VECES >= 3001) THEN 10700 ELSE 10800
10700 TICF = TVAF
10800 QII = .3 * ((TICF - T(1)) ^ 1.25) - (1.73E-09 * E * F * (((TICF + 460) ^ 4) - ((T(1) + 460) ^ 4)))
10900 IF (VECES <= 2851) AND (VECES <= 3000) THEN 11000 ELSE 11100
11000 GOSUB 27700
11100 QEE = .3 * ((T(27) - TAM) ^ 1.25) + (1.73E-09 * E * F * (((T(27) + 460) ^ 4) - ((TAM + 460) ^ 4)))

```

```

11200 REM ..CONVERTIR QEE,QII,HII Y HEE DE UNIDADES INGLESAS A UNIDADES DE S.I.
11300 QI=QII*7.3346E-05
11400 QE=QEE*7.3346E-05
11500 IF (VECES >= 3001) THEN 11600 ELSE 11900
11600 GOSUB 28500
11700 PRINT "TFA(C)= "; TFA : PRINT "Qcal(J)=";(QI+QE)*AI*(-4.186)
11800 GOTO 12200
11900 REM ...INTERPRETACION DE LAS CONSTANTES ELABORADAS MEDIANTE EL USO DEL
12000 RETORNO ...METODO IMPLICITO DE SOLUCION, PARA EL CALCULO DE LA TRANSFERENCIA
12100 REM ...DE CALOR EN ESTADO IHESTABLE".
12200 REM ...PARA EL NODO 1...
12300 A(1)=-DR1*(DI+DR1)
12400 B(1)=(1/FOR)*((RI+DR1/2)^2)-(RI^2)
12500 AMTD(1)=0
12600 BMTD(1)=B(1)-A(1)
12700 CMTD(1)=A(1)
12800 DMTD(1)=(B(1)*T(1))-((QI*AI*(DR1^2))/(KR*PI*L))
12900 REM ...PARA LOS NODOS DE 2 A 11...
13000 FOR I = 1 TO 10
13100 A(I+1)=-2*DR1*(RI+((3/2)+(I-1))*DR1)
13200 B(I+1)=-2*DR1*(RI+((1/2)+(I-1))*DR1)
13300 D(I+1)=(1/FOR)*((RI+((3/2)+(I-1))*DR1)^2)-((RI+((1/2)+(I-1))*DR1)^2)
13400 NEXT I
13500 FOR I = 1 TO 10
13600 AMTD(I + 1) = B(I + 1) / D(I + 1)
13700 BMTD(I + 1) = 1 - ((A(I + 1) + B(I + 1)) / D(I + 1))
13800 CMTD(I + 1) = A(I + 1) / D(I + 1)
13900 DMTD(I + 1) = T(I + 1)
14000 NEXT I
14100 REM ...PARA EL NODO 12...
14200 A(12)=-K1*DR2*(DI+(2*FI)+DR2)
14300 B(12)=-((DR2^2)/DR1)*(DI+(2*E1)-DR1)
14400 D(12)=(1/FOPI)*((RI+E1+DR2/2)^2)-((RI+E1-DR1/2)^2)
14500 AMTD(12)=B(12)/D(12)
14600 BMTD(12)=1-((A(12)+B(12))/D(12))
14700 CMTD(12)=A(12)/D(12)
14800 DMTD(12)=T(12)
14900 REM ...PARA LOS NODOS DEL 13 AL 17...
15000 FOR I = 1 TO 5
15100 A(12+I)=-2*DR2*(RI+E1+((3/2)+(I-1))*DR2)
15200 B(12+I)=-2*DR2*(RI+E1+((1/2)+(I-1))*DR2)
15300 D(12+I)=(1/FOA)*((RI+E1+((3/2)+(I-1))*DR2)^2)-((RI+E1+((1/2)+(I-1))*DR2)^2)
15400 NEXT I
15500 FOR I = 1 TO 5
15600 AMTD(I+12)=B(I+12)/D(I+12)
15700 BMTD(I+12)=1-((A(I+12)+B(I+12))/D(I+12))
15800 CMTD(I+12)=A(I+12)/D(I+12)
15900 DMTD(I+12)=T(I+12)
16000 NEXT I
16100 REM ...PARA EL NODO 18...
16200 A(18)=-K2*DR3*(DI+(2*(E1+E2))+DR3)
16300 B(18)=-((DR3^2)*(DI+(2*(E1+E2))-DR2))/DR2
16400 D(18)=(1/FOF2)*((RI+E1+E2+DR3/2)^2)-((RI+E1+E2-DR2/2)^2)
16500 AMTD(18)=B(18)/D(18)
16600 BMTD(18)=1-((A(18)+B(18))/D(18))
16700 CMTD(18)=A(18)/D(18)
16800 DMTD(18)=T(18)
16900 REM ...PARA LOS NODOS DEL 19 AL 23...
17000 FOR I = 1 TO 5

```



```

17100 A(18+I)=-2*DR3*(RI+E1+E2+((J/2)+(I-1))*DR3)
17200 B(18+I)=-2*DR3*(RI+E1+E2+((1/2)+(I-1))*DR3)
17300 D(18+I)=(1/FOC)*(((RI+E1+E2+((3/2)+(I-1))*DR3)^2)-((RI+E1+E2+((1/2)+(I-1))*
*DR3)^2))
17400 NEXT I
17500 FOR I = 1 TO 5
17600 AMTD(I+18)=B(I+18)/D(I+18)
17700 BMTD(I+18)=1-((A(I+18)+B(I+18))/D(I+18))
17800 CMTD(I+18)=A(I+18)/D(I+18)
17900 DMTD(I+18)=T(I+18)
18000 NEXT I
18100 REM ...PARA EL NODO 24...
18200 A(24)=-K3*DR4*(DI+(2*(E1+E2+E3))+DR4)
18300 B(24)=-((DR4^2)*DI+(2*(E1+E2+E3))-DR3)/DR3
18400 D(24)=(1/FOC)*(((RI+E1+E2+E3+DR4/2)^2)-((RI+E1+E2+E3-DR3/2)^2))
18500 AMTD(24)=B(24)/D(24)
18600 BMTD(24)=1-((A(24)+B(24))/D(24))
18700 CMTD(24)=A(24)/D(24)
18800 DMTD(24)=T(24)
18900 REM ...PARA LOS NODOS 25 Y 26...
19000 FOR I = 1 TO 2
19100 A(24+I) = -2 * DR4 * (RI + E1 + E2 + E3 + (((3 / 2) + (I - 1)) * DR4))
19200 B(24 + I) = -2 * DR4 * (RI + E1 + E2 + E3 + (((1 / 2) + (I - 1)) * DR4))
19300 D(24 + I) = (1 / FOC) * (((RI + E1 + E2 + E3 + E3 + ((3 / 2) + (I - 1)) * DR4)
^ 2) - ((RI + E1 + E2 + E3 + ((1 / 2) + (I - 1)) * DR4) ^ 2))
19400 NEXT I
19500 FOR I = 1 TO 2
19600 AMTD(I + 24) = B(24 + I) / D(24 + I)
19700 BMTD(I + 24) = 1 - ((A(24 + I) + B(24 + I)) / D(24 + I))
19800 CMTD(I + 24) = A(24 + I) / D(24 + I)
19900 DMTD(I + 24) = T(I + 24)
20000 NEXT I
20100 REM ...PARA EL NODO 27...
20200 A(27) = -DR4 * (DI + (2 * (E1 + E2 + E3)) + 5 * DR4)
20300 B(27) = (1 / FOC) * (((RI + E1 + E2 + E3 + E4) ^ 2) - ((RI + E1 + E2 + E3
+ (5 * DR4) / 2) ^ 2))
20400 AMTD(27) = A(27)
20500 BMTD(27) = B(27) - A(27)
20600 CMTD(27) = 0
20700 DMTD(27) = (B(27) * T(27)) - ((QE * AE * (DR4^2)) / (KC * PI * L))
20800 GOSUB 22400
20900 REM ...IMPRESION DE RESULTADOS EN GRADOS CELSIUS...
21000 CLS
21100 PRINT "TIEMPO = "; NDT * DT
21200 FOR I = 1 TO 27
21300 PRINT I, ((T(1)-32)/1.8)
21400 NEXT I
21500 IF (VECES < 2881) THEN PRINT "Qpc(J)="; (Q1+QE)*AI*(-4.186) ELSE 21600
21600 IF (VECES >= 2881) AND (VECES <= 3000) THEN 21700 ELSE 21900
21700 PRINT "Qconf(J)="; (QEN-QE)*AI*4.186
21800 GOTO 21900
21900 IF (VECES = 3072) GOTO 22200
22000 GOTO 9700
22100 CLOSE #1
22200 PRINT "TFA('C) = "; TFA : PRINT "Qcal(J)="; (Q1+QE)*AI*(-4.186)
22300 END
22400 REM ...SUBROUTINA PARA LA RESOLUCION DE LA MATRIZ TRIDIAGONAL...
22500 REM !IF VECEs=2881 AND VECEs=3000 GOSUB 25900
22600 REM !IF VECEs=3072 GOSUB 25900
22700 CLS

```

```

22800 IFF = 1
22900 BETA( IFF ) = BMTD( IFF )
23000 GAMMA( IFF ) = DMTD( IFF ) / BETA( IFF )
23100 NDT = NDT + 1
23200 IFF = IFF + 1
23300 FOR I = IFF TO NTN
23400 BETA( I ) = BMTD( I ) - AMTD( I ) * CMTD( I - 1 ) / BETA( I - 1 )
23500 GAMMA( I ) = ( DMTD( I ) - AMTD( I ) * GAMMA( I - 1 ) ) / BETA( I )
23600 NEXT I
23700 V( NTN ) = GAMMA( NTN )
23800 LAST = NTN - 1
23900 FOR J = 1 TO LAST
24000 I = NTN - J
24100 V( I ) = GAMMA( I ) - CMTD( I ) * V( I + 1 ) / BETA( I )
24200 NEXT J
24300 FOR I = 1 TO 27
24400 T2( I ) = V( I )
24500 NEXT I
24600 RETURN
24700 END
24800 GOSUB 24900
24900 REM ... SUBROUTINA PARA EL ARCHIVAMIENTO DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS,
25000 REM ... DENTRO DE UN ARCHIVO SECUENCIAL.
25100 REM ... "creacion del archivo secuencial (de salida) para 27 temperaturas
25200 REM ... para cada intervalo de tiempo establecido por el usuario."
25300 WRITE #1, NDT*DT
25400 FOR I = 1 TO 27
25500 WRITE #1, ((T2(I)-32)/1.8)
25600 NEXT I
25700 RETURN
25800 REM ... CONTINUACION DEL ARCHIVO SECUENCIAL ...
25900 REM ... "creacion del archivo secuencial (de entrada) para 27 temperaturas
26000 REM ... para cada intervalo de tiempo establecido por el usuario."
26100 CLS
26200 'OPEN "TEMPS" FOR INPUT AS #1
26300 'IF EOF(1) THEN 23700
26400 'INPUT #1, TIEMPO
26500 'FOR I = 2 TO 28
26600 'INPUT #1, T( I - 1 )
26700 'NEXT I
26800 'INPUT #1, DESECHO
26900 'PRINT TIEMPO
27000 'FOR I = 1 TO 27
27100 'PRINT "T( "; I; ") = "; T( I )
27200 'NEXT I
27300 'PRINT
27400 'GOTO 22500
27500 'CLOSE #1
27600 'RETURN
27700 REM ... SUBROUTINA PARA PREDECIR EL ENFRIAMIENTO DE LA OLLA UNA VEZ
27800 REM ... RETIRADO EL QUEMADOR.
27900 QR = ((1.73E-09*(T(1)^4-TAN^4))/((1/(A1*F12))+((1-ER)/(A1*ER))))+(5*A1*(T(1)
-TAN))
28000 QII = QR / A1
28100 QEN = QII*7.5346E-05
28200 QE = QEE*7.5346E-05
28300 RETURN
28400 END
28500 REM ... SUBROUTINA PARA PREDECIR LA TEMPERATURA FINAL DEL LIQUIDO DESPUES
28600 REM ... DEL VACIADO DE ACERO LIQUIDO PROVENIENTE DEL H.E.A. 43

```

28700 QC=HAC\*AI+(((T(1)-32)/1.8)-TVA)  
28800 TFA=(QC/(MAG+CML))+TVA  
28900 TVA=TFA  
29000 RETURN  
29100 END