

Simulación de un horno eléctrico de arco CC para aceración: estudio de la región del arco y del baño metálico^(*)

Marco Aurelio Ramírez Argáez* y Luis Gerardo Trápaga Martínez**

- Resumen** Se desarrolló un modelo matemático que describe el flujo de fluidos, transferencia de calor y fenómenos electromagnéticos en las regiones del arco y baño en hornos eléctricos de arco de corriente continua (HEA-CC). El modelo predice patrones de flujo y distribuciones de temperatura bajo la influencia del arco eléctrico y del burbujeo de argón en baños monofásicos (acero) ó en sistemas bifásicos (acero / escoria). Para validar, parcialmente, el modelo se usaron mediciones experimentales citadas en la literatura sobre sistemas análogos al HEA. Bajo las condiciones analizadas, el burbujeo de argón domina el flujo de fluidos promoviendo excelente homogenización dentro del baño. La escoria afecta negativamente al mezclado, fomentando la formación de zonas calientes sobre la superficie del acero. El arco eléctrico calienta al baño y lo agita mediante fuerzas electromagnéticas. Asimismo, se encontró que las fuerzas boyantes y de corte sobre la superficie del baño son despreciables relativas a las electromagnéticas.
- Palabras clave** Modelos matemáticos. Flujo de fluidos. Transferencia de calor. Arco eléctrico. Inyección de gas. Fabricación de acero. Horno eléctrico de arco.

Simulation of a DC electric arc furnace for steelmaking: study in the arc and bath regions

- Abstract** A mathematical model was developed to describe fluid flow, heat transfer, and electromagnetic phenomena in the arc and bath regions of DC Electric Arc Furnaces (DC-EAF). The model is used to examine the effect on flow patterns and temperature distribution in the bath, under the influence of both an arc and bottom argon injection in steel or steel/slag systems. Validation of the model employed experimental measurements from systems physically related to DC-EAF from literature. For the conditions analyzed, electromagnetic forces dominate the fluid motion in the bath. Buoyancy and shear forces from the arc have a negligible effect in driving the flow; however, they partially counteract the electromagnetic forces. Slag decreases fluid motion in the steel and enhances temperature stratification in the system. Stirring of the bath, using a 3-nozzle inert gas injection system, is found to promote temperature uniformity in the regions near the lateral wall of the furnace.
- Keywords** Mathematical modeling. Fluid flow. Heat transfer. Electric arc. Gas injection. Steelmaking. Electric arc furnace.

1. INTRODUCCIÓN

Recientemente, la industria del acero ha mostrado una tendencia en la cual existe un creciente

interés en la adopción del horno eléctrico de arco de corriente continua (HEA-CC), debido a que estos sistemas presentan varias ventajas con relación a los tradicionales sistemas de corriente alterna

(*) Trabajo recibido el día 12 de enero de 2001 y aceptado en su forma final el día 25 de julio de 2001.

(*) División de Estudios de Posgrado e Investigación. Programa de Graduados en Materiales del Instituto Tecnológico de Morelia. Avenida Tecnológica No. 1500, Colonia Lomas de Santiaguillo, CP 58120, Morelia, Michoacán, México. email: mramirez@alum.mit.edu

(**) Laboratorio de Investigación en Materiales CINEVESTAV-IPN Unidad Querétaro, Libramiento Norponiente No. 2000, Fracc. Real de Juriquilla, C.P. 76230, Querétaro, Qro, México email: trapaga@arcos.qro.cinvestav.mx

(HEA-AC). Algunas de las ventajas conocidas son la reducción en el consumo de electrodos, en los efectos desestabilizadores del arco y en el nivel del ruido^[1]. Además, el uso de la corriente directa incrementa la agitación dentro del acero líquido, gracias a las fuerzas electromagnéticas generadas por el paso de la corriente eléctrica a través del baño. Sin embargo, también se reconoce que los HEA aún no son tan eficientes como la industria desea. La industria ha implementado una serie de innovaciones tecnológicas para resolver o reducir la ineficiente operación de los HEA. Por ejemplo, se sabe que la práctica conocida como "foaming slag" (escoria espumosa) ayuda a mejorar la transferencia de calor desde el arco hacia el baño metálico. Actualmente, en plantas modernas es común introducir calor al baño por medio del uso de quemadores empleando oxi-combustibles, ya que la energía química asociada a las reacciones de combustión y oxidación resulta más barata que la energía eléctrica. De manera similar, es ahora común emplear la inyección de gases por el fondo para agitar y homogenizar los baños metálicos, así como la adopción de sistemas de ultra alta potencia. Sin embargo, a pesar de todas las mejoras tecnológicas impuestas en la operación de los HEA, la eficiencia en el consumo de energía está todavía lejos de ser la mejor característica de estos reactores^[2]. Esta es la razón por la cual se considera que, con el objeto de crear un impacto positivo en la productividad y en la eficiencia de los HEA, es fundamental adquirir el conocimiento científico que describa de manera rigurosa los fenómenos físicos que están involucrados en el proceso, es decir, transferencia de calor, transferencia de masa, flujo de fluidos y fenómenos electromagnéticos.

En la búsqueda de este conocimiento básico, algunos autores han contribuido previamente. Ushio *et al.*^[3] presentaron el primer intento para proveer una representación matemática de la región del arco en un HEA basada en las ecuaciones magneto-hidrodinámicas turbulentas y relaciones turbulentas de transferencia de calor por convección. Sin embargo, para resolver el problema, Ushio asumió, de antemano, el perfil de algunas características del arco, así como otras suposiciones simplificativas que limitaron la representación realista del arco. Szekely *et al.*^[4] presentaron un modelo similar pero, adicionalmente, investigaron, por primera vez, el efecto del arco sobre la temperatura y movimiento del fluido en un baño de acero, al acoplar dos modelos matemáticos (uno en la región del arco y otro en la región del baño). Además, ellos

propusieron por primera vez expresiones asociadas a los mecanismos de transferencia de calor desde el arco hacia el baño, es decir, convección, radiación, y componentes electrónicos. Después de estos dos artículos pioneros, han aparecido otros trabajos en la literatura siguiendo la misma formulación empleada por Szekely, entre los cuales podemos citar los trabajos de Qian *et al.*^[5], Liping Gu *et al.*^[6], Seungho Paik *et al.*^[7], Kurimoto *et al.*^[8], y Liping Gu *et al.*^[9] quién, además, modeló física y matemáticamente algunas operaciones del HEA, tales como inyección de gases por medio de lanzas, burbujeo por decarburización ("carbon boil"), etc.. Por su parte, Bowman^[10 y 11] ha dado importante información del orden de magnitud y análisis físico acerca de la compleja estructura y características físicas de los arcos eléctricos.

Experimentalmente, Deneys y Robertson^[12 y 13] construyeron un HEA a escala de laboratorio para estudiar el efecto que tiene el arco eléctrico en fundidos de escoria en procesos de limpieza de escorias (*slag cleaning processes*). Murthy^[14] y Kang^[15] desarrollaron sendos sistemas experimentales mediante los que se analizó el efecto de las fuerzas electromagnéticas sobre el flujo de fluidos y la estructura turbulenta en pequeños sistemas conteniendo un metal de bajo punto de fusión (*woods metal*). Otras contribuciones igualmente importantes son las mediciones experimentales de las velocidades del plasma hechas por Bowman^[16] en arcos eléctricos de baja corriente, así como las mediciones de la forma del arco y de la densidad de corriente en el *spot* del cátodo reportadas por Jordan *et al.*^[17].

El presente trabajo ofrece el desarrollo de un modelo matemático capaz de describir el comportamiento de un HEA-CC, ya que se han podido simular las regiones del arco eléctrico y del baño metálico de una manera más realista que en trabajos previos. La región del arco se analiza, por primera vez, considerando el efecto de las corrientes inducidas. Además, en el modelo del baño metálico se describe el efecto del arco sobre el flujo de fluidos y la distribución de temperaturas al incorporar las condiciones de frontera provenientes del modelo del arco en el cómputo del baño. Las distintas fuerzas motrices provenientes del arco se analizan para dilucidar su importancia relativa (el esfuerzo de corte del plasma, fuerzas boyantes y fuerzas electromagnéticas). Finalmente, la presencia de una capa de escoria, así como la incorporación de burbujeo desde el fondo, se discuten a través de este trabajo.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Una representación simplificada de un HEA-CC en la etapa de refinación, donde se ha fundido toda la chatarra de acero, se bosqueja en la figura 1a). La idealización del reactor consiste en considerar al sistema dividido en dos regiones principales. La primera región se localiza en el espacio formado entre el cátodo de grafito y la superficie del baño, es decir, la región del arco eléctrico. La segunda región está constituida por el baño mismo, donde escoria, acero y gases provenientes de las prácticas de inyección o de la decarburación están presentes, es decir, el baño es en realidad un sistema trifásico. Ambas regiones están acopladas a través de la interfase donde el arco provee el calor necesario para, primeramente, fundir la chatarra y, posteriormente, mantener al baño en su estado líquido. El arco también introduce corriente eléctrica al baño para cerrar el circuito eléctrico de corriente directa. En este sentido, el flujo de electrones pasa desde el cátodo a través del arco y, luego, entra y viaja a través del baño hasta que alcanza la superficie del ánodo donde el circuito se cierra. Finalmente, la última interacción arco-baño proviene de la interacción mecánica debido al choque violento del *jet* del arco sobre la superficie libre del baño. El *jet* formado cerca del cátodo, debido a las enormes fuerzas electromagnéticas encontradas ahí, se dirige de manera vertical hacia la superficie del baño y cuando choca con ésta, se desvía radialmente. El punto de choque produce una alta presión en la interfase arco-baño que deforma la superficie del baño creando una depresión en el líquido, mientras que la deflexión radial del *jet* causa un esfuerzo de corte que actúa sobre la superficie del metal fundido. De esta forma, la presión del arco, el esfuerzo de corte, el flujo de calor y el flujo de corriente por unidad de área desde el arco son los elementos que permiten acoplar los dos modelos y además hacen posible describir el efecto del arco eléctrico sobre el baño metálico en un HEA-CC. Es importante hacer notar que el presente modelo no toma en cuenta la deformación de la superficie libre, de tal suerte que el cálculo del baño depende del cálculo del arco, pero la región del arco es independiente del cálculo del baño (Fig. 1b).

3. MODELACIÓN MATEMÁTICA

3.1. Modelación matemática de la región del arco

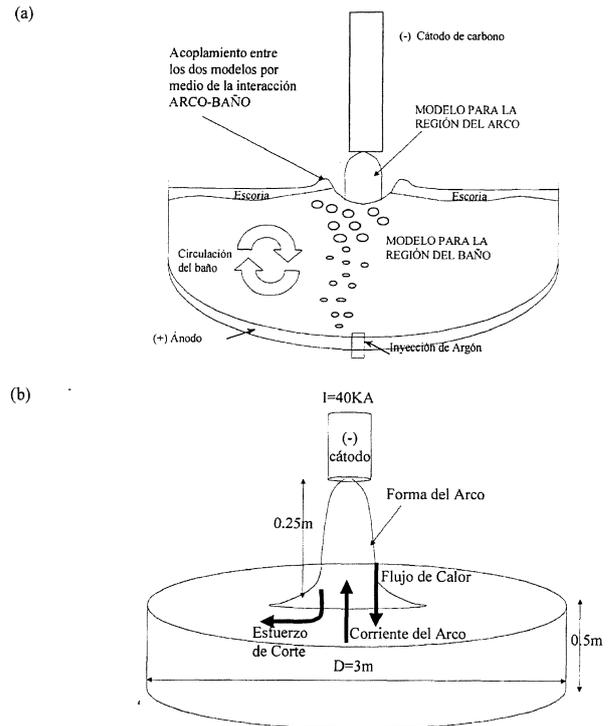


Figura 1. El sistema de un HEA DC. 1a). Representación esquemática de la aproximación seguida en este trabajo. 1b). Características geométricas del sistema.

Figure 1. The DC Electric arc furnace system. 1a). Schematic representation of the approach followed in this work. 1b). Geometric features of the system.

Por razones de espacio no se da a conocer los detalles asociados con la modelación matemática del proceso en ambas regiones. Para una descripción completa del modelo del arco y de los modelos del baño, involucrando el juego completo de ecuaciones gobernantes, condiciones de frontera, propiedades físicas y suposiciones se puede consultar la literatura^[18]. Sin embargo, de manera breve, se puede afirmar que las principales suposiciones empleadas en el modelo del arco son:

- el arco se considera en equilibrio termodinámico local (*local thermodynamic equilibrium* ó LTE)^[19]
- la superficie del baño se considera plana, es decir, no se considera depresión
- los efectos de la compresibilidad son despreciados
- el único gas presente en el plasma es aire. Además, se supone que la densidad de corriente que deja la superficie del cátodo a través del *spot* es constante y con un valor de $4,4 \times 10^7 \text{ Am}^{-2}$ ^[17]. El modelo del arco resuelve simultáneamente

las ecuaciones de conservación de masa, las ecuaciones turbulentas de Navier-Stokes, la ecuación turbulenta de conservación de energía y la ecuación del potencial eléctrico (usando la forma de Poisson para incluir la representación de las corrientes inducidas) junto con el modelo estándar de turbulencia $k-\epsilon$, para un sistema de coordenadas polares cilíndricas en estado estacionario.

Adicionalmente, la ley de Ohm y las leyes de Maxwell se emplean para resolver totalmente las características eléctricas del arco. Las propiedades físicas del aire son una función de la temperatura y se toman a partir del trabajo de Murphy^[20]. En cuanto a condiciones de frontera, las más importantes son las eléctricas, donde se asigna el flujo electrónico en el *spot* del cátodo y un potencial constante de cero voltios en la superficie del baño. El resto de las fronteras se aíslan del flujo de corriente. En cuanto a la conservación de energía, las fronteras de presión fija reciben o introducen calor debido a la salida o entrada de gas al dominio. En el cátodo, la temperatura es fija (4.000 K), siguiendo la relación entre la densidad de corriente y temperatura para emisión termiónica de electrones^[18], mientras que en la superficie del baño se asignan pérdidas por convección y pérdidas de calor asociadas al flujo de corriente eléctrica. Como términos fuente o sumidero en la ecuación de calor, destacan la generación de calor por el efecto Joule, las pérdidas por radiación, así como las pérdidas por el efecto Thompson.

En este trabajo se considera sólo un arco eléctrico, cuyas características son: una corriente de operación de 40 KA y una longitud del arco de 0,25 m. Bajo la influencia de este arco se analizarán el flujo de fluidos y las distribuciones de temperatura dentro del baño.

3.2. Modelación matemática de la región del baño

En el trabajo se proponen tres representaciones o modelos diferentes de la región del baño metálico:

- Modelo del baño bajo la influencia del arco eléctrico y considerando solamente acero ocupando la región del baño (modelo de una fase).
- Modelo del baño bajo el efecto del arco y con agitación mediante el burbujeo de argón por el

fondo del reactor. Este es un modelo bifásico acero-argón (gas-líquido).

- Modelo del baño bajo el efecto del arco y con una capa de escoria sobre el baño metálico. Este modelo del baño es también bifásico escoria-metal (líquido-líquido).

3.2.1. Descripción general del modelo del baño (basada en el caso monofásico de acero)

3.2.1.1. Suposiciones y ecuaciones gobernantes

Las suposiciones del modelo son las siguientes:

- las propiedades físicas de todas las fases son independientes de la temperatura
- la interfase arco-baño se supone completamente plana
- el sistema se puede representar en estado estacionario estableciendo un sistema de coordenadas cilíndricas
- se desprecian las corrientes inducidas en el baño

Las ecuaciones gobernantes son:

- ecuación de continuidad
- ecuaciones turbulentas de Navier-Stokes
- ecuación turbulenta de conservación de energía
- ecuaciones de Maxwell, de conservación de carga y ley de Ohm
- las ecuaciones de conservación para la energía cinética turbulenta, k , y para la rapidez de disipación de energía, ϵ , empleadas en el modelo de turbulencia $k-\epsilon$ estándar

3.2.1.2. El problema electromagnético y su acoplamiento a las ecuaciones de momento y calor

Como se explica en (18), la siguiente ecuación del potencial eléctrico se puede derivar combinando, de las leyes de Maxwell, la ley de conservación de carga y la ley de Ohm:

$$\nabla^2 \phi = 0 \quad (1)$$

donde, ϕ es el potencial eléctrico (V). La ecuación (1) es la ecuación de conservación que, de manera práctica, se resuelve con el resto de las ecuaciones

de conservación, en vez de usar todas las ecuaciones de Maxwell. A su vez, los componentes de la densidad de corriente se pueden obtener, una vez conocido el potencial eléctrico, por medio de la ley de Ohm:

$$J_r = -\sigma \frac{\partial \phi}{\partial r} \quad (2a)$$

$$J_z = -\sigma \frac{\partial \phi}{\partial z} \quad (2b)$$

donde, J_r and J_z son las densidades de corriente radial y axial respectivamente (A/m^2), r y z son las coordenadas espaciales radial y axial (m), y σ es la conductividad eléctrica del acero ($Ohm^{-1} m^{-1}$). La componente azimutal de la densidad de flujo de campo magnético, B , se deriva de la ley de Amperre de la siguiente manera:

$$B = \frac{\mu_0}{r} \int_0^R 2\pi r J_z dr \quad (3)$$

donde μ_0 es la permeabilidad magnética ($4\pi \times 10^{-7}$ henry/m). Las ecuaciones (1-3) constituyen la solución del problema electromagnético en el baño.

Las fuerzas electromagnéticas ($J \times B$), constituyen el enlace entre los fenómenos electromagnéticos y el flujo de fluidos (ecs. 4a y 4b). El acoplamiento entre los fenómenos electromagnéticos y la transferencia de calor es a través de calor Joule, Q_{joule} , (ec. 5). Finalmente, la transferencia de calor y los fenómenos de flujo de fluidos se acoplan a través de las fuerzas boyantes expresadas por medio de la aproximación de Boussinesq (ec. 6)^[21]:

$$F_r = -J_z B \quad (4a)$$

$$F_z = J_r B \quad (4b)$$

$$Q_{joule} = \left(\frac{J_z^2 + J_r^2}{\sigma} \right) \quad (5)$$

$$F_{buoyancy} = -\rho \gamma g (T - T_o) \quad (6)$$

donde F_r y F_z son las componentes radial y axial de las fuerzas electromagnéticas (N/m^3), ρ es la densidad del acero (Kg/m^3) a la temperatura de referencia, $T_o(K)$, g es el vector gravitacional (m/s^2), γ es el coeficiente de expansión térmica (K^{-1}) y T es la temperatura (K).

3.2.1.3. Condiciones de frontera

Las condiciones de frontera en las paredes reflejan velocidades nulas y cero valores de los parámetros turbulentos, mientras que el enlace entre la región laminar y la turbulenta se da con la aproximación de funciones pared. Además, se prescriben valores constantes para las temperaturas en las paredes. Para el potencial eléctrico, la pared del fondo se asume como un buen conductor de la electricidad y constituye al ánodo, y por ende se le asigna un potencial constante de cero voltios, mientras que las paredes laterales se consideran no conductoras de la corriente eléctrica. En el eje de simetría, todas las variables presentan una condición de cero flujo. Finalmente, en la superficie superior del baño, el flujo de calor, el esfuerzo de corte, y el flujo de corriente eléctrica provenientes del cálculo del arco en la interfase arco-baño, se introducen como condiciones de frontera para las ecuaciones de conservación de energía, de momento radial y de potencial eléctrico, respectivamente. Adicionalmente, se permite que el acero pierda calor por radiación desde esa misma superficie.

3.2.1.4. Propiedades físicas de las fases y parámetros geométricos del reactor

Una lista de las propiedades físicas de las fases acero, escoria y argón empleadas en los cálculos de los modelos del baño, así como los parámetros geométricos usados en las simulaciones asociados a la operación, se presentan en la tabla I.

3.2.2. Modelo gas-líquido

Cuando se incluye la inyección de argón a través de toberas por el fondo, el proceso de burbujeo hace que el modelo del baño sufra variaciones importantes con relación al modelo monofásico presentado previamente. La inyección del gas involucra la solución de un juego completo de ecuaciones de conservación, tanto para el gas como para la fase líquida. De esta manera, el sistema argón-acero se manipula con la aproximación Euleriana-Euleriana que se implementa numéricamente con la técnica llamada IPISA (*Inter-Phase Slip-Algorithm*)^[22]. Adicionalmente, debido a que la práctica del burbujeo es excéntrica, el cálculo del sistema bifásico argón-acero debe ser tridimensional. Otra característica importante del método numérico es que el potencial eléctrico se asocia exclusivamente con el acero, es decir, con la fase

Tabla I. Propiedades físicas del acero, escoria y argón así como valores numéricos de algunos parámetros geométricos del reactor

Table I. Numerical values of some geometric parameters of the reactor and also physical properties of steel, slag, and argon

Propiedades físicas del acero	
Densidad, ρ_l (Kg/m ³)	7.200
Calor Específico, C_{p_l} (J/Kg K)	670
Viscosidad, μ_l (Kg/m s)	1.873 K
Conductividad Térmica, k_l (W/m K)	6,5×10 ⁻³
Conductividad Eléctrica, σ_l (Ohm ⁻¹ m ⁻¹)	15
Coefficiente Expansión Térmica, γ_l (K ⁻¹)	7,14×10 ⁵
	1,4×10 ⁻⁴
Propiedades físicas del argón	
Densidad, ρ_g (Kg/m ³)	1,18
Calor Específico, C_{p_g} (J/Kg K)	520
Viscosidad, μ_g (Kg/m s)	300 K
Conductividad Térmica, k_g (W/m K)	2,0×10 ⁻⁵
Tensión Superficial Ar-Acero, σ_{int} (J/m ²)	1,893×10 ⁻⁴
	1,8
Propiedades físicas de la escoria	
Densidad, ρ_{slag} (Kg/m ³)	2.300
Calor Específico, $C_{p_{slag}}$ (J/Kg K)	1.157
Viscosidad _{escoria} (Kg/m s)	1.873 K
Conductividad Térmica, $k_{escoria}$ (W/m K)	0,43
	0,1509
Valores numéricos de los parámetros usados en el modelo	
Radio del Horno (m)	1,5
Profundidad del Líquido (m)	0,5
Longitud del Arco (m)	0,25
Corriente del Arco (KA)	40
Temperaturas de las Paredes (K)	1.773
Número de Toberas	3
Localización de las Toberas	$r/R_{horno}=0,625$
Diámetro de la Tobera (m)	0,005
Diámetro de Burbuja, D_p , (m)	0,029437
Flujo Volumínico de Gas, Q , (m ³ /s)	5,0×10 ⁻⁴

conductora. Análogamente, la turbulencia se considera como propiedad de la fase líquida continua.

3.2.2.1. Términos fuente interfaciales y otros términos especiales

Adicionalmente a los términos fuente, descritos en el modelo monofásico, una fuente importante, de momento, para la fase gas es el efecto boyante debido a la diferencia de densidades entre el gas y el líquido.

La relación entre las dos fases se localiza en la intercara gas-líquido donde ambas fases intercam-

bian momento y calor. Las expresiones que describen el intercambio de momento (fricción entre el gas y el líquido) y la transferencia de calor entre las fases se encuentran debidamente expresadas en la tabla II. Los términos fuente interfaciales involucrados en las ecuaciones de conservación tanto para el gas como para el líquido tienen valores idénticos pero distinto signo. La fuerza motriz para la fuerza de fricción en la interfase es la diferencia de velocidades entre las fases, mientras que la transferencia de calor en la interfase se promueve por diferencias de temperatura, también entre las fases. Finalmente, se debe mencionar que con el burbujeo se genera más turbulencia debido al ascenso de burbujas a través del líquido, y que matemáticamente se aproxima con términos fuente adicionales en las ecuaciones de conservación para los parámetros turbulentos, como los que propone López *et. al.*^[23] para este caso de inyección de gases en líquidos. Estos términos se pueden encontrar en la literatura^[18].

3.2.2.2. Condiciones de frontera

Las condiciones de frontera, adicionales a las presentadas anteriormente, se encuentran en la entrada para el gas, donde se asigna la velocidad del gas sobre la base del flujo de volumen y del diámetro de la tobera, mientras que la temperatura del gas a la entrada se supone igual a la temperatura de la pared. En la superficie libre, se permite el escape del gas y entonces, la entalpía que llevan las burbujas y que dejan el dominio se interpreta como una fuente negativa o sumidero de calor para la ecuación de conservación de la fase gas.

3.2.3. Modelo escoria-metal

El acero y la escoria son líquidos inmiscibles y por este motivo la interfase que separa a ambas fases es bien definida debido a las notables diferencias de densidad entre ellas. Esta interfase bien definida hace que este sistema bifásico (acero-escoria) sea completamente distinto al anterior sistema gas-líquido, donde el gas estaba disperso dentro del acero. Por lo tanto, el sistema es tratado como un problema de superficie libre entre dos líquidos. Para abordar dicho problema, se implementa una técnica numérica que emplea el uso de marcadores denominada "Scalar Equation Method" (SEM)^[24]. Con esta técnica se efectúa un cálculo monofásico y la presencia de la escoria se determina por medio del valor del marcador (la unidad para nodos

Tabla II. Términos fuente interfaciales usados en la simulación bifásica para las ecuaciones de energía y momento

Table II. Interfacial source terms used in the two phase calculation for the energy and momentum conservation equations

Fuerza de fricción ^[22]	$F_{fricción} = C_f (V_b - V_l)$ <p>C_f es el coeficiente de fricción, V_b es la velocidad del gas, V_l es la velocidad del líquido. La diferencia $V_b - V_l$, se conoce como velocidad de deslizamiento, V_{slip}.</p>
Transferencia de calor	$S_{H_{int}} = hA(T_g - T_l)$ <p>donde h es el coeficiente de transferencia de calor, T_g es la temperatura nodal en la fase gaseosa y T_l es la temperatura nodal en la fase líquida, A es el área superficial de las burbujas por unidad de volumen. El coeficiente de transferencia de calor se calcula a partir del número de Nusselt local.</p> $Nu = \frac{hD_p}{k}$ <p>donde k es la conductividad térmica y D_p es el tamaño de la burbuja. El número de Nusselt para el intercambio de calor burbuja-líquido se obtiene a partir de correlaciones empíricas^[22]</p>

completamente ocupados por acero y el valor cero para nodos ocupados en su totalidad por escoria). El marcador es libre de moverse por convección, pero no se le permite transportarse por difusión. De esta manera, la posición de la superficie libre entre los dos líquidos se considera que estará formada por la unión de las posiciones en donde el marcador tenga valores intermedios entre uno y cero. La importancia del marcador es definir la interfase para poder asignar las propiedades físicas (ya sea acero o escoria) del fluido, en esta simulación monofásica, que, por cierto, requiere de la representación transitoria de acuerdo a la técnica SEM empleada.

4. RESULTADOS

4.1. Región del arco

El modelo del arco se implementó en una malla computacional no uniforme de 38×38 celdas en el código de dinámica de fluidos "PHOENICS" versión 3.2. El modelo corrió en un procesador Pentium en 333 MHz y tardó 90 minutos para obtener convergencia después de 3.000 iteraciones.

La figura 2a muestra los campos de velocidad y de presión para un arco con 40 KA de corriente eléctrica y con una longitud de 0,25 m en aire. El *jet* de alta velocidad que se desarrolla dentro del arco se puede explicar con la ayuda del campo de presiones que se presenta acompañando la misma

figura 2a. Entonces, se deduce que el *jet* se forma como una consecuencia de la alta presión formada debajo del cátodo de grafito, la cual aparece como contrapeso de las fuerzas de Lorentz que predominan en esa región. Esta zona de alta presión dirige al *jet* hacia el baño (con velocidades mayores a 8.000 m/s), mientras que la región que rodea al cátodo aporta fluido que es succionado a la región de alta presión. Los procesos de mezclado de plasma caliente con aire frío y la turbulencia hacen que el *jet* se expanda, desde un pequeño *spot* en el cátodo a diámetros del arco cada vez más grandes, conforme crece la dirección axial desde el cátodo, y, cuando el *jet* choca con la superficie plana del baño, se produce una deflexión radial. Este choque crea una segunda zona de alta presión sobre la superficie del baño, tal y como se observa en la figura 2a.

La figura 2b muestra las distribuciones de temperatura, de potencial eléctrico, así como el campo vectorial de densidades de corriente en la región del arco eléctrico. Se puede apreciar que se encuentran temperaturas del orden de 27.000 K debajo del cátodo, como consecuencia de la importante contribución del calor Joule producido por las elevadas intensidades de corriente presentes en la región. La expansión del arco se puede apreciar si se observa con atención el campo de temperaturas. La isoterma de 10.000 K se considera como el límite del arco (que se define como la zona de conducción de corriente eléctrica), y de

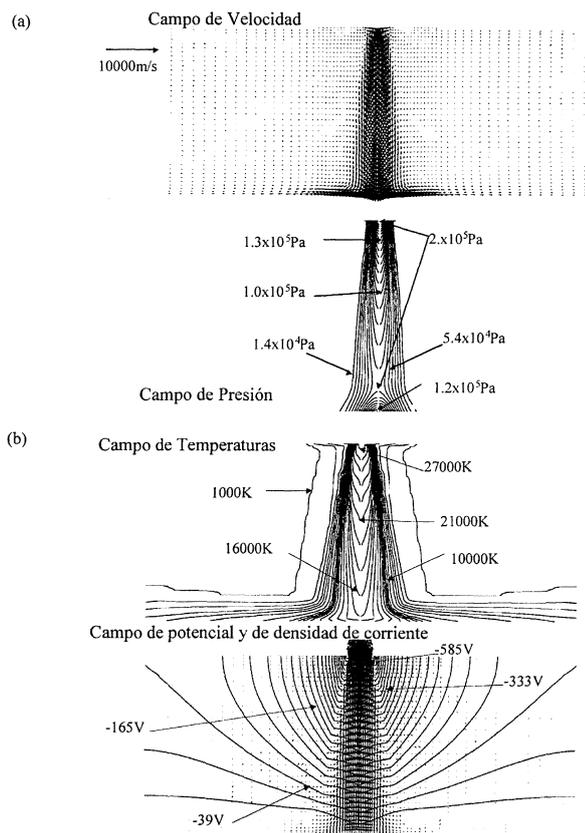


Figura 2. Arco eléctrico con 40 KA de corriente y 0,25 m de longitud. 2a). Campos de velocidad y de presión. 2b). Campos de temperatura, potencial y densidad de corriente.

Figure 2. Electric arc with a current of 40 KA and arc length of 0.25 m. 2a). Velocity and pressure fields. 2b). Temperature, electric potential, and current density fields.

hecho describe la forma del arco al demarcar la zona con luminosidad. El campo vectorial de densidades de corriente muestra la misma forma de expansión del arco y se puede apreciar que las densidades de corriente disminuyen en magnitud, conforme el arco se va expandiendo en dirección axial, para satisfacer la ley de conservación de carga (es decir, al aumentar el área de conducción, disminuye el valor de la densidad de corriente). Cabe señalar que la deflexión de las densidades de corriente cercanas al eje de simetría se debe a que la contribución de las corrientes inducidas domina cerca del eje de simetría.

Sin embargo, la información de mayor importancia que el modelo genera es la descripción cuantitativa de las interacciones arco-baño calculadas de manera fundamental con datos provenientes del modelo del arco. En la figura 3a se muestra el flujo de calor por unidad de área como una función de la posición radial en el baño. Todos los mecanismos de transferencia de calor que

contribuyen al calentamiento del baño se muestran en la misma gráfica, es decir, las contribuciones por convección, por radiación y electrónicas. Se puede apreciar que en el centro del baño, las contribuciones electrónicas son las más importantes. Sin embargo, la gráfica del flujo de calor acumulado dada en la figura 3b muestra que el mecanismo de transferencia de calor que más contribuye al calentamiento del baño es la convección del jet de plasma, dejando en un plano secundario a la contribución por radiación y, por último, las componentes electrónicas.

La figura 4 muestra la distribución de densidad de corriente y el esfuerzo de corte sobre la superficie del baño metálico provenientes del plasma. Es importante destacar que las figuras 3a, 3b y 4 sirven como condiciones de frontera sobre la superficie superior en los modelos del baño metálico.

4.2. Modelo del baño (modelo monofásico)

El modelo monofásico (sólo acero presente) se implementó en el código "PHOENICS" versión 3.2, y el modelo numérico corrió con una malla bidimensional de 60×40 celdas en una hora con 10.000 iteraciones para obtener soluciones que convergen completamente en estado estacionario, usando un procesador Pentium con 233 MHz.

La figura 5a muestra los campos de velocidad y temperatura obtenidos bajo la influencia del arco analizado con anterioridad. Los campos de velocidad muestran un movimiento recirculatorio simple en dirección de las manecillas del reloj con velocidades altas (1,2 m/s), fluyendo hacia abajo sobre el eje de simetría y velocidades muy bajas en ascenso, cerca de la pared lateral del horno. El centro del circuito de recirculación se localiza a la mitad de la distancia entre el fondo y la superficie libre y cargado hacia la pared lateral. Inspeccionando el perfil de temperaturas, se puede apreciar que la distribución de calor recibido en la superficie libre del metal líquido provoca la formación de un spot caliente en la superficie. Sin embargo, el movimiento recirculatorio del fluido ayuda, al menos en parte, a disipar el calor, de tal manera que el campo de temperaturas es una consecuencia tanto del campo de velocidades como del flujo de calor por unidad de área proveniente del arco que se recibe en la superficie libre del baño. Es evidente que la parte central del baño parece tener pronunciados gradientes de temperatura comparados con el resto del reactor. Esto implica que la circulación del fluido no es lo suficientemente vigorosa como para

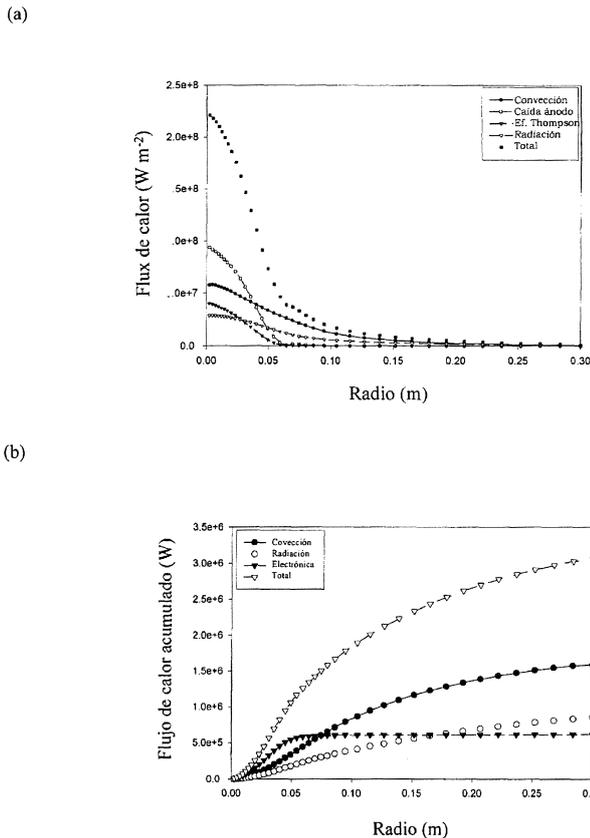


Figura 3. Transferencia de calor al ánodo. 3a). Cuatro diferentes mecanismos contribuyen a la transferencia de calor desde el arco hacia el ánodo (convección, caída de voltaje en el ánodo o baño, efecto Thompson y radiación). 3b). Flujo de calor acumulado sobre el ánodo debido a los distintos mecanismos de transferencia de calor

Figure 3. Heat transfer to the anode. 3a). Four different mechanisms contribute to the heat transfer from the arc to the anode, i.e. convection, anode fall, Thompson effect and radiation). 3b). Cumulative heat flow over the anode due to the different heat transfer mechanisms.

distribuir en todo el reactor la cantidad de calor que llega proveniente del arco a través de la superficie del baño, y, en consecuencia, la temperatura no es muy homogénea dentro del reactor. En este caso, la máxima temperatura encontrada en el reactor es de 1.960 K, mientras que la mínima es de 1.750 K, es decir, existe una diferencia de 210 K entre las zonas fría y caliente dentro del horno.

Por otra parte, con objeto de evaluar el efecto de cada fuerza motriz para mover al fluido, se analizan las diferentes fuerzas de cuerpo de manera individual (sin considerar las otras fuerzas en el cómputo) y sus resultados se comparan con el caso del efecto combinado de todas las fuerzas (Fig. 5a). La figura 5b muestra el efecto de las fuerzas boyantes. En este caso, el patrón de recirculación del fluido está dirigido en contra de las manecillas del reloj,

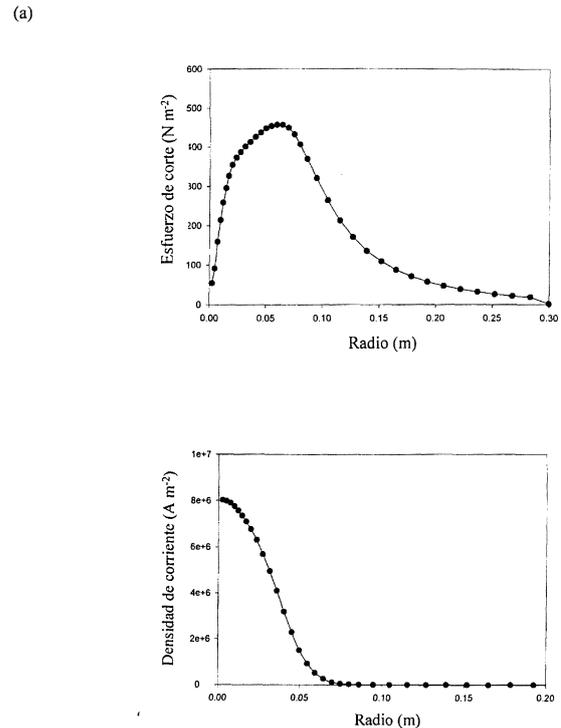


Figura 4. Condiciones de frontera en la superficie del baño metálico. 4a). Esfuerzo de corte sobre el baño. 4b). Densidad de corriente eléctrica sobre la superficie del baño. El arco tiene una corriente de 40 KA y una longitud de 0,25 m.

Figure 4. Boundary conditions at the bath surface. 4a). Shear stress on the bath. 4b). Current density over the bath surface. The arc has a current of 40 KA and an arc length of 0.25 m.

es decir, el fluido se dirige hacia arriba en el eje de simetría y hacia abajo cerca de la pared lateral. Las fuerzas boyantes logran mover el metal líquido sólo a muy bajas velocidades ($\sim 0,1$ m/s) y el campo de temperaturas muestra un spot caliente en exceso, debido a que las velocidades son tan bajas que el calor procedente del arco a la zona central de la superficie libre casi no se puede disipar (por supuesto, que las temperaturas tan elevadas solo son hipotéticas).

La figura 5c muestra el efecto individual del esfuerzo de corte del plasma sobre la superficie del acero líquido. En este caso, el movimiento recirculatorio tiene la misma dirección que el patrón recirculatorio formado por las fuerzas boyantes, solo que ahora las velocidades máximas son mayores ($\sim 0,5$ m/s). Sin embargo, se puede apreciar que las velocidades altas solo están localizadas sobre la superficie (en contacto con el plasma), mientras que el resto del líquido se mueve con velocidades extremadamente bajas. Por este motivo, la estratificación de temperaturas muestra elevados

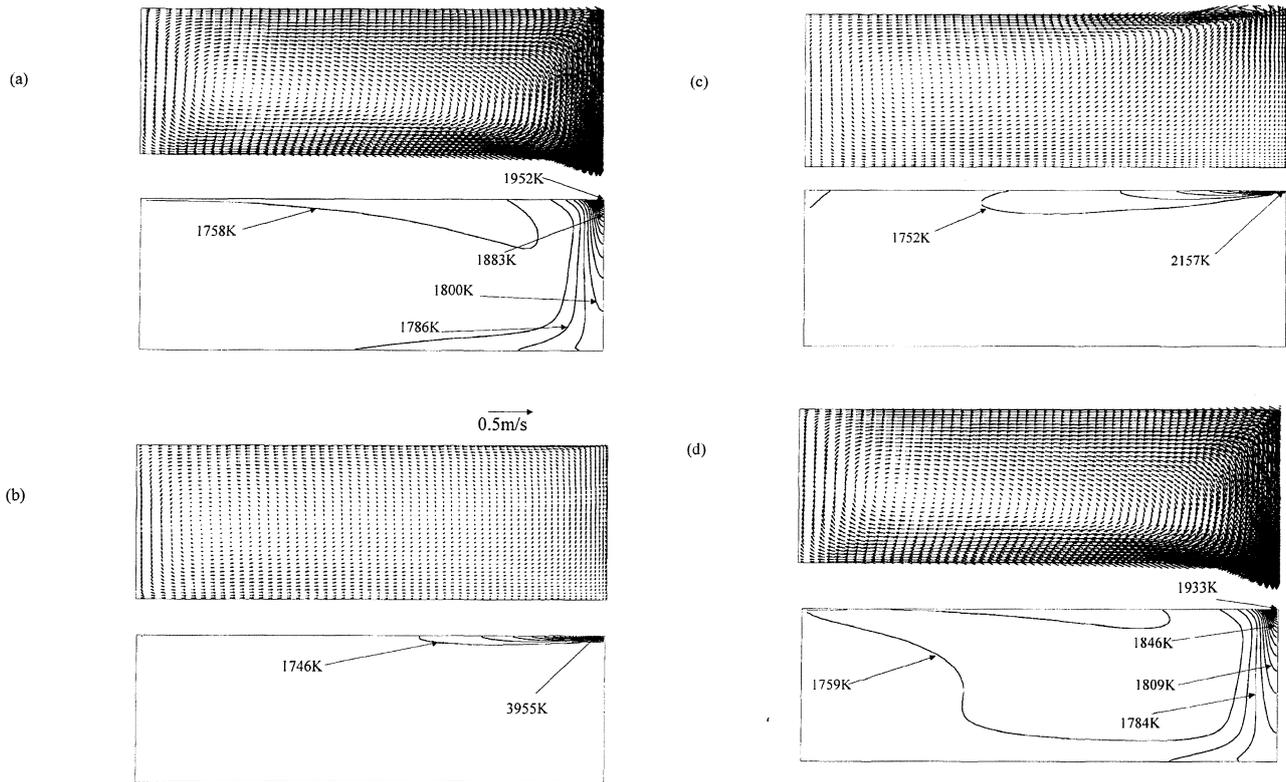


Figura 5. Campos de velocidad y temperatura en la región del baño bajo diferentes efectos o fuerzas motrices para el flujo de fluidos provenientes del arco. 5a). Efecto combinado (esfuerzo de corte, fuerzas boyantes, y fuerzas electromagnéticas) 5b). Solamente efecto boyante. 5c). Solamente efecto del esfuerzo de corte 5d). Solamente efecto de las fuerzas electromagnéticas.

Figure 5. Velocity and temperature field in the bath region under the effect of different driving forces coming from the arc for the fluid flow. 5a). Combined effect (shear stress, buoyancy forces, and electromagnetic forces) 5b). Only buoyancy. 5c). Only shear stress 5d). Only electromagnetic forces.

gradientes formados como consecuencia de la pobre disipación de calor obtenida por medio del movimiento recirculatorio establecido con el esfuerzo cortante del plasma en la superficie libre del baño.

Finalmente, el efecto de las fuerzas electromagnéticas se analiza en la figura 5d. El patrón de recirculación, el campo de velocidades y la distribución de temperaturas son muy similares a los obtenidos con el efecto combinado de todas las fuerzas motrices del flujo de fluidos (mostrado en la figura 5a). Por lo tanto, es muy claro que las fuerzas electromagnéticas son las que dominan el flujo de fluidos y son las responsables de la distribución de temperaturas y velocidades dentro de la región del baño. Sin embargo, a pesar de que los campos vectoriales de velocidad de las figuras 5a y 5d se ven exactamente iguales a simple vista, el campo de temperaturas es evidentemente diferente, teniendo mayores temperaturas debajo del arco para el caso del efecto combinado (Fig. 5a) que en

el caso aislado de fuerzas electromagnéticas (Fig. 5d). Entonces, a pesar de que las fuerzas boyantes y el esfuerzo de corte no dominan el movimiento de fluidos, su efecto si es sensible cerca de la superficie del baño ya que ambas fuerzas promueven recirculaciones en sentido opuesto al que promueven las fuerzas electromagnéticas y de algún modo contrarrestan levemente el efecto de estas últimas, disminuyendo el mezclado.

4.3. Modelo del baño (modelo bifásico acero-argón)

En la figura 6 se muestra el campo de velocidades (a) y de temperaturas (b) en el líquido, para distintos planos del HEA agitado mediante la inyección de gases por el fondo a través de 3 toberas, localizadas en el mismo radio y espaciadas simétricamente una de la otra. Por razones de simetría, se muestra sólo 1/6 del reactor (para detalles en los parámetros empleados, ver tabla I). En este caso,

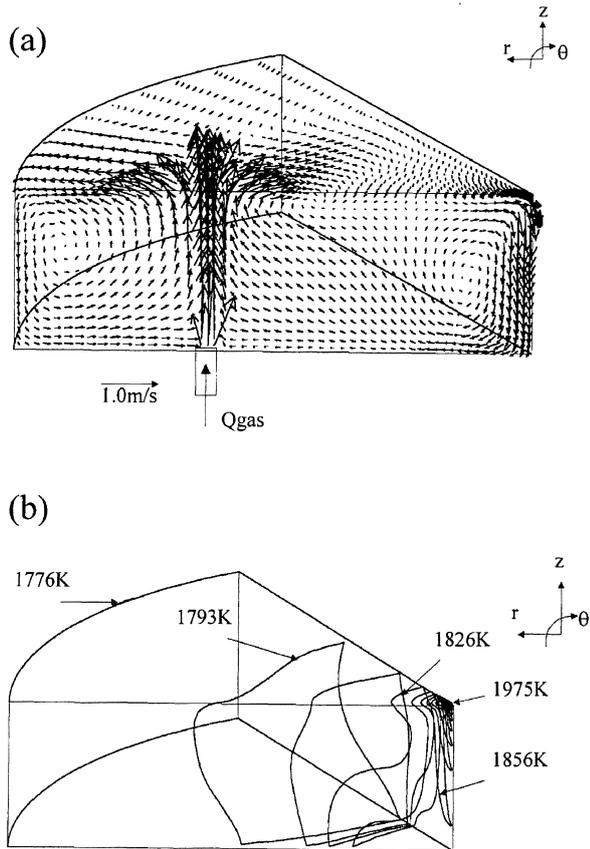


Figura 6. a). Campo de velocidades en el líquido. b). Campo de temperaturas en el líquido en la región del baño bajo la influencia de un arco eléctrico con corriente de 40 KA y 0.25 m de longitud y la inyección de gas argón a través de 3 toberas. Se presenta solo 1/6 del sistema debido a la simetría del problema.

Figure 6. a). Velocity field. b). Temperature field in the liquid steel of the bath region under the influence of the electric arc (40 KA and 0.25 m) and the injection of argon gas through three nozzles located in the bottom of the reactor. Only 1/6 th of the system is presented due to the symmetry of the problem.

se combina la inyección de gas argón para agitar al baño de acero con el resto de las fuerzas motrices para el flujo de fluidos. Es evidente que existen dos zonas de predominio: cerca del eje de simetría, las fuerzas electromagnéticas dominan el flujo de fluidos; sin embargo, el flujo de acero en la mayor parte del reactor está siendo dominado por la inyección de argón. Por tanto, la combinación de estos efectos parece producir un campo de velocidades en donde no existen zonas estancadas o muertas. En general, podemos mencionar que el reactor está mejor mezclado al tener menores gradientes de temperaturas y al observar que la diferencia entre la zona más fría y caliente es de, solamente, 50 K (a comparar con los 210 K sin agitación con gas; ver figura 5a).

Rev. Metal. Madrid 37 (2001)

4.4. Modelo del baño (modelo bifásico acero-escoria)

En la figura 7 se muestran los campos de velocidad (a) y temperaturas (b) en el sistema de dos líquidos (acero-escoria). Se introdujo de manera artificial una pequeña pared para prevenir que la escoria estuviese en contacto con el arco eléctrico en la zona de influencia del arco, es decir, la porción central de la superficie libre. Esto fue completamente necesario, ya que si la escoria estuviese en contacto con el arco, el contacto eléctrico se perdería y el circuito se abriría, puesto que la escoria no conduce la corriente eléctrica como lo hace el acero líquido. En la realidad del proceso, la escoria no está en contacto con el arco ya que el choque del plasma sobre el baño empuja radialmente hacia afuera a la escoria y forma una depresión en el baño, quedando el metal expuesto al arco. De esta forma, la presión que ejerce el arco ayuda a prevenir que la escoria se aproxime al centro del reactor. Desafortunadamente, en su estado actual, este modelo es incapaz de predecir las depresiones en la superficie del baño formadas por el jet de plasma. Se procedió a poner una barrera como truco numérico artificial para simular de una manera más realista el sistema líquido-líquido. En la figura 7a se ve que la escoria produce una disminución general en la magnitud de las velocidades en el baño de acero, por lo que el tiempo de circulación aumenta y el mezclado

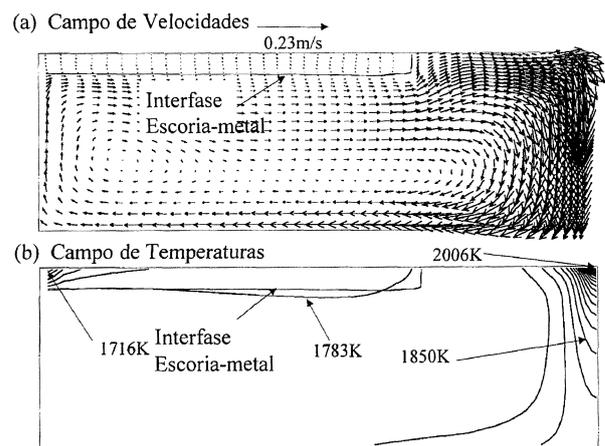


Figura 7. Campo de velocidad y temperatura en la región del baño bajo los efectos del arco eléctrico (40 KA y 0.25 m) y una capa de escoria encima del acero. 7a). Campo de velocidades. 7b). Campo de temperaturas.

Figure 7. Temperature and velocity fields in the bath region under the combined effect of the electric arc (40KA and 0.25 m) and a layer of slag on the top of the steel. 7a) Velocity field; 7b) Temperature field.

disminuye. Ahora la máxima velocidad es de 0,4 m/s, que contrasta con la de 1,22 m/s obtenida con el modelo monofásico, esto es, sin escoria presente (bajo el mismo arco eléctrico). Similarmente, la capa de escoria también afecta, de manera importante, al perfil de temperaturas, ya que la escoria funge como un aislante térmico. Esto provoca que el acero esté más caliente que cuando la escoria no se considera. Hay que mencionar que la escoria está casi estática, ya que su viscosidad es mucho mayor a la del acero, pero sí se encuentra en movimiento, formando un patrón de recirculación en sentido contrario al formado dentro del acero.

5. VALIDACIÓN

Ya que el HEA-CC es un proceso sumamente complejo, el esfuerzo del modelado debe ser complementado de manera paralela con un programa experimental para recabar información que aporte conocimiento del sistema y sirva para validar la modelación matemática. Sin embargo, la adquisición de los datos en hornos industriales es casi imposible debido a las condiciones agresivas que existen en el sistema. Por esto, el horno^[12 y 13] tiene la relevancia de proveer, al menos, una validación parcial del modelo. En su sistema experimental, usado para fundir escorias, el baño de escoria se calienta por medio de un arco eléctrico con una corriente de 160 A y una longitud de arco de 0,025 m. El ánodo se localiza en una pequeña sección de la pared lateral. Las simulaciones numéricas fueron desarrolladas para describir este sistema empleando un modelo similar al descrito para el baño monofásico en este trabajo. La figura 8a muestra el campo de velocidades calculado sobre la superficie libre y el bosquejo de las líneas de flujo obtenidas experimentalmente mediante grabaciones de videocámara. El movimiento del fluido, en este caso, es dominado por fuerzas boyantes y no por electromagnéticas ya que las corrientes empleadas en el mini-reactor son muy pequeñas y además la escoria presenta una conductividad eléctrica que es varios ordenes de magnitud menor a la conductividad eléctrica del acero. Cualitativamente, los patrones de flujo simulados y medidos concuerdan muy bien.

Otro caso encontrado en la literatura y que se puede usar para validar parcialmente los modelos del baño desarrollados, es el sistema experimental descrito por Kang *et al.*^[15]. En su sistema, el efecto de la agitación electromagnética se analizó en un pequeño contenedor cilíndrico lleno de metal *woods*. La corriente se transmitió al fundido me-

dante un electrodo colocado encima del metal, el cual toca la superficie libre del líquido, mientras que el fondo del contenedor constituye la superficie conductora del ánodo. El resultado es un patrón recirculatorio formado en el metal, similar a la recirculación obtenida en el modelo de una fase que se muestra en la figura 5a. Una ilustración de la comparación entre los perfiles radiales estimados y medidos se presenta en la figura 8b, donde se puede apreciar que existe una buena concordancia entre las predicciones y las mediciones experimentales.

Finalmente, las mediciones experimentales de velocidades del *jet* en arcos eléctricos ardiendo entre un cátodo de grafito en aire informados por Bowman^[11] son extraordinarias para validar el modelo del arco eléctrico, a pesar de que el orden de magnitud de la corriente usada en sus experimentos (1.150 A) es mucho menor a la corriente empleada hornos industriales (~ 50 KA). La figura 8c muestra el perfil velocidad axial en el *jet* de plasma a lo largo del eje de simetría calculado con el modelo junto con las mediciones experimentales para un arco eléctrico con 1.150 A y 0,07 m de longitud. Como se puede observar en la figura, existe muy buena concordancia entre los datos experimentales y las predicciones proporcionadas por el modelo.

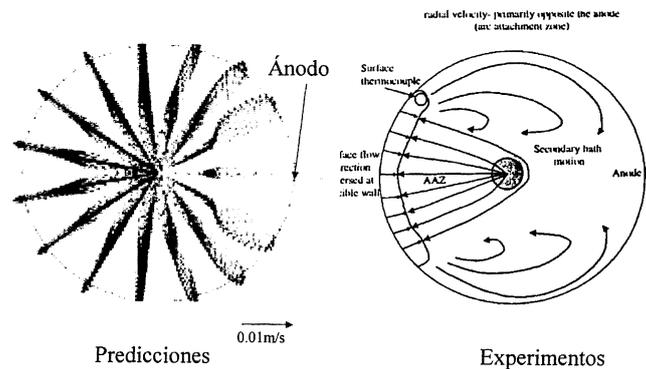
6. CONCLUSIONES

Se desarrolló un modelo matemático de electromagnetismo, transferencia de calor y flujo de fluidos en un HEA-CC. El modelo incluye las representaciones del arco eléctrico y el baño del horno acoplados a través de la superficie del baño. El efecto de las fuerzas electromagnéticas, boyantes, de corte del plasma desde el arco sobre la circulación del baño y la distribución de temperaturas, ha sido considerado de manera separada y en su efecto combinado. Además, se desarrollaron cálculos separados para comparar el efecto de la inyección de gas inerte a través del fondo del baño, así como el efecto de una capa de escoria encima del baño metálico.

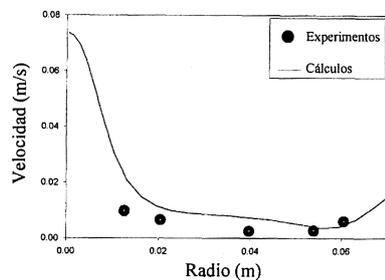
Los resultados del modelo indican que el baño se calienta predominantemente por convección del plasma. En el baño metálico, y en la ausencia de inyección de gases en un baño sin escoria, se concluye que las fuerzas electromagnéticas dominan al flujo de fluidos y son las responsables de crear un patrón recirculatorio simple en dirección de las manecillas del reloj, con velocidades altas

(a)

Campo superficial de velocidades



(b)



(c)

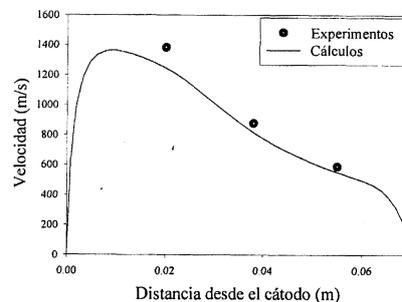


Figura 8. Validación del modelo del baño. 8a). Comparación entre los campos superficiales de velocidad y de temperatura calculados contra el patrón de flujo obtenido experimentalmente por Robertson *et. al.* en un horno CC de laboratorio. 8b). Comparación entre el perfil de velocidad medido experimentalmente por Kang^[15] contra el calculado con el modelo a lo largo del radio en una posición de 0,035 m desde el fondo del reactor cilíndrico usado para examinar el efecto de las fuerzas electromagnéticas sobre el flujo de fluidos en metales. 8c). Comparación entre simulaciones y mediciones experimentales de velocidad del *jet* a lo largo del eje de simetría, hechas por Bowman para un arco de 1.150 A y 0,07 m de longitud.

Figure 8. Model validation. 8a). Comparison between the computed and the experimentally determined velocity fields at the bath surface on the experimental set up built by Robertson et. al. 8b). Computed and measured^[15] velocity profile along the radius at 0.035 m from the bottom of a small reactor used to examine the effect of the electromagnetic body forces on the fluid flow of liquid metals. 8c). Comparison between simulations and experimental measurements by Bowman of the axial velocity profile along the symmetry axis for a 1150 A and 0.07 m electric arc.

en la región central del reactor (dirigidas hacia abajo), y velocidades relativamente bajas cerca de la pared lateral (dirigidas hacia arriba). Las fuerzas boyantes y de corte por el plasma, aunque despreciables, contrarrestan el flujo electromagnético. El efecto de la cubierta de escoria es reducir de manera global la velocidad en el seno del metal, así como aislar térmicamente al acero, con lo cual sus temperaturas se incrementan. La inyección de gas argón por el fondo produce un incremento en el mezclado del horno, sobre todo en la región cercana a la pared lateral, previniendo la estratificación de temperaturas, al ayudar a disipar el calor suministrado por el arco en la región central del baño.

Aunque se requieren esfuerzos mayores para validar al modelo bajo las condiciones de fabricación de acero actuales, los autores consideran que el modelo presentado en este trabajo se puede usar con una herramienta útil para ganar entendimiento de los procesos que ocurren en el HEA CC.

REFERENCIAS

- [1] R.F. FRUEHAN, *Metall. Mater. Trans. A* 28 (1997) 1963-1973.
- [2] E. FRITZ y J. STEINS MPT *Metall. Plant Technol. Int.* 4 (1998) 74-80.

- [3] M. USHIO, J. SZEKELY, C.W. CHANG, *Ironmaking Steelmaking*, 6 (1981) 279-286.
- [4] J. SZEKELY, J. MCKELLIGET y M. CHOUDHARY, *Ironmaking Steelmaking*, 10 (1983) 169-179.
- [5] F. QIAN, B. FAROUK y R. MUTHARASAN, *Metall. Mater. Trans. B* 26 (1995) 1057-1067.
- [6] L. GU y J.A. BAKKEN *ISHMT. Turkey*. (1994) 92-101.
- [7] S. PAIK y H.D. NGUYEN, *Int. J. Heat Mass Trans.* 38 (1995) 1161-1171.
- [8] H. KURIMOTO, H.N. MONDAL y T. MORISUE, *J. Chem. Eng. Jpn*, 29 (1996) 75-81.
- [9] L. GU y G.A. IRONS *Electr. Furn. Conf. Proc.* Iron and Steel Society, ISS, New Orleans, LA, EE. UU., 1998, pp. 411-420.
- [10] B. BOWMAN, G.R. JORDAN y F. FITZGERALD. *J. Iron & Steel Inst.* (1969) 798-805.
- [11] B. BOWMAN, *Electr. Furn. Conf. Proc.* Iron and Steel Society, ISS, 1994, pp. 111-120.
- [12] A.C. DENEYS y D.G.C. ROBERTSON. *Electr. Furn. Conf. Proc.* Iron and Steel Society ISS. New Orleans, LA, EE. UU., 1998, pp. 423-432.
- [13] A.C. DENEYS y D.G.C. ROBERTSON, *Fluid Flow Phenomena in Metals Processing*. The Minerals, Metals & Materials Society TMS. , San Diego, CA CA, EE.UU., 1999, pp. 127-137.
- [14] A. MURTHY, M.I.T. Tesis Doctoral, 1984 34.
- [15] T. KANG, M.I.T. Tesis Doctoral, 1987 125-145.
- [16] B. Bowma, *J. Phys. D:* 5 (1972) 1422-1432.
- [17] G.R. JORDAN, B. BOWMAN y D. WAKELAM, *J. Phys. D:* 3 (1969) 1089-1099.
- [18] M.A. RAMÍREZ, M.I.T. Tesis Doctoral, 2000 34-55.
- [19] M.I. BOULOS, P. FAUCHAIS y E. PFENDER, *Thermal Plasmas - Fundamentals and Applications*. Vol. 1. New York, Plenum Press, 1994, pp. 452.
- [20] A.B. MURPHY, *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 15 (1995) 279-307.
- [21] J. SZEKELY y N.J. THEMELIS, *Rate Phenomena in Process Metallurgy*. first ed., John Wiley & Sons, Inc. New York, EE. UU., 1971 p. 784.
- [22] D.B. SPALDING, *IPSA: New Developments and Computed Results*, Imperial College, London, Inglaterra, 1991 p. 15.
- [23] M. LOPEZ, *Int. J. Multiphase Flow*, 20 (1994) 805-810.
- [24] D.B. SPALDING, *PCH PhysicoChemical Hydrodynamics* 10 (1988) 625-637.