

Simulación del proceso de fusión y obtención de los diagramas de red para el horno de cubilote de la Universidad de Antioquia

Ricardo Emilio Aristizábal Sierra*

^aGrupo de Investigaciones Pirometalúrgicas y de Materiales —GIPIMME—, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería de Materiales. Universidad de Antioquia A. A. 1226. Medellín, Colombia.

(Recibido el 21 de octubre de 2005. Aceptado el 8 de noviembre de 2005)

Resumen

A partir de información experimental se encontraron los valores de los parámetros de ajuste más adecuados para simular el comportamiento del horno de cubilote de la Universidad de Antioquia con el programa AFS Cupola Model. Además se construyeron, mediante simulación, los diagramas generalizados de red para esta unidad de fusión en particular.

Se obtuvieron los perfiles del comportamiento de la temperatura, los gases y el contenido de carbono en el metal. Los diagramas de red incluyen el diagrama básico generalizado de red con soplo a temperatura ambiente y sin enriquecimiento con oxígeno. Además se realizó un análisis del comportamiento de la producción y la temperatura del metal en piqueta cuando se trabaja con soplo caliente y enriquecimiento con oxígeno, lo que permitió evidenciar las ventajas de trabajar con este tipo de técnicas.

Se encontró que el valor de los parámetros utilizados para ajustar el *software*, está dentro de un intervalo acorde con su concepto físico inherente, que el ajuste del *software* con respecto a la información experimental es aceptable y que el comportamiento de los perfiles y los diagramas de red obtenidos se ajusta con lo observado en la práctica. Se destaca la posibilidad de construir los diagramas de red para otros cubilotes mediante el mismo procedimiento con muy buenos resultados.

----- *Palabras clave:* horno de cubilote, diagramas de *Jungbluth*, simulación de procesos de fundición.

* Autor de correspondencia: teléfono: +57+4+210 55 42, fax: +57+4+210 55 18, correo electrónico: raristi@udea.edu.co (R. Aristizábal Sierra)

Simulation of melting process and net diagrams for the Cupola Furnace of the University of Antioquia

Abstract

The best values of the adjustable parameters of the AFS Cupola Model for modeling the cupola furnace of University of Antioquia were obtained from experimental data. Generalized net diagrams were simulated and developed for this unit.

Profiles of temperature, gas phase concentrations and carbon content in the metal were obtained. The net diagrams include the basic generalized net diagram, with ambient temperature blasting and without oxygen enrichment. In addition, the behavior of production and temperature of metal at the tap hole under preheated blasting and oxygen enrichment was analyzed. This analysis allowed us to demonstrate the advantages of working under those conditions. The value of the parameters used to adjust the software was in agreement with their inherent physical meaning. Moreover, the software predictions (E.G, profiles and the diagram) agree with the experimental observations. The possibility to build net diagrams for other cupola with the same procedure highlighted.

----- *Key words:* cupola furnace, net diagrams of *Jungbluth*, simulation of melting process.

Introducción

El horno de cubilote se utiliza en la industria de la fundición principalmente para fabricar hierros. Se reporta que el 70% del hierro fundido en el mundo se fabrica con este tipo de unidades de fusión [1].

La vigencia del cubilote se debe a su versatilidad, fácil adaptación a las nuevas tecnologías, bondades de operación y bajos costos de inversión inicial. En los últimos años el aumento en el costo de los combustibles derivados del petróleo, la escasez de chatarra de buena calidad (debido a la gran demanda de países como China) que limita la utilización de los hornos de inducción y los bajos precios del hierro en el mercado mundial, han hecho que el uso del cubilote como unidad principal de fusión se fortalezca, ya que además de las ventajas que presenta desde el punto de vista metalúrgico, el hierro producido en cubilote es el de menor precio.

Desde su aparición se han realizado un sinnúmero de mejoras y modificaciones al cubilote; se pueden mencionar: la utilización de dos filas de toberas, el enriquecimiento del soplo con oxígeno, el precalentamiento del aire utilizado para la combustión, el control de las emisiones atmosféricas contaminantes y en los últimos tiempos la formulación de modelos matemáticos que permiten simular su operación [2]. Estos modelos se clasifican en estadísticos y termoquímicos [3].

Los primeros se construyen a partir de información experimental y relacionan las variables respuesta más importantes como producción, temperatura y composición química del metal en piqueta, con los parámetros de operación como caudal del soplo, porcentaje de enriquecimiento con oxígeno, relación coque-metal, entre otros, mediante herramientas de regresión estadística. Aunque poseen la desventaja de que no proporcionan información teórica acerca del funcionamiento del equipo y sólo pueden utilizarse de manera particular para las unidades en las cuales se haya realizado el estudio, son una herramienta muy valiosa para el control durante la operación de los fundidores. Los modelos estadísticos más

utilizados son los llamados diagramas de red del cubilote o diagramas de Jungbluth de los cuales se hablará más adelante.

Los modelos termoquímicos se basan en el planteamiento de las ecuaciones matemáticas que rigen los fenómenos que ocurren en el interior del horno de cubilote, utilizando como herramientas principales las leyes de transferencia de calor, transferencia de masa, cinética química y termodinámica.

La ventaja principal de este tipo de modelos es que, además de que permiten realizar simulaciones de la operación, están en capacidad de adaptarse a cualquier unidad de fusión, ya que su construcción está basada en los fenómenos más importantes en el sistema, además permiten formarse conceptos de lo que ocurre durante la operación.

Actualmente el modelo matemático termoquímico más completo es el desarrollado por la AFS (American Foundry Society), el cual de acuerdo con sus autores está en capacidad de predecir la producción, la temperatura, el porcentaje de carbono, silicio y manganeso del metal en piqueta con desviaciones máximas de 10, 5, 0,2, 0,2 y 0,1% respectivamente, en donde los errores de las cantidades expresadas en porcentaje se calculan como el error absoluto [4].

En el presente artículo se muestra el ajuste realizado al programa *AFS Cupola Model* para simular la operación del horno de cubilote de la planta ecoeficiente de la Universidad de Antioquia. El ajuste se realizó mediante la utilización de los valores de los parámetros que brindan los mejores resultados en relación con la información experimental. Se tiene información experimental de tres coladas realizadas en el marco del proyecto “Estudio del comportamiento del silicio adicionado como carburo de silicio en el horno de cubilote”. Se compararon los resultados reales y los simulados y se realizó un análisis de los perfiles de temperatura, composición de los gases de combustión y porcentaje de carbono en el material metálico que el *software* proporciona. Mediante simulaciones se construyó el diagrama

de red generalizado con sople a temperatura ambiente y sin enriquecimiento con oxígeno. Se realizó un estudio del comportamiento de la producción y la temperatura del metal en piqueta bajo diferentes condiciones de operación, relacionadas con el enriquecimiento del aire del sople con oxígeno, el precalentamiento del sople y la relación coque-metal.

Los diagramas de red del cubilote.

Conocidos también como diagramas de *Jungbluth*, relacionan en forma de cartas las variables de operación que pueden controlarse, es decir el caudal del aire del sople a condiciones normales y el porcentaje de carbono en el coque con respecto al metal en la carga, con las variables respuesta producción y temperatura del metal. Son una herramienta muy valiosa que permite a los fundidores controlar su operación de acuerdo con las necesidades de producción. Los diagramas de red se pueden clasificar en convencionales, generalizados, modificados y simplificados.

Los convencionales se construyen a partir de la información obtenida por Massari y Lindsay, cuyo estudio fue realizado en un cubilote de viento frío con un diámetro interno al nivel de las toberas de 72" (1,83 m). El caudal del sople se encuentra a condiciones estándar y la relación carbono-metal corresponde a la relación de la cantidad de carbono en el coque con respecto al metal cargado, sin tener en cuenta el carbono que se consume carburando el metal.

El diagrama de red generalizado es el desarrollado por Patterson, Siepmann y Pacyna. Está basado en la información obtenida en un cubilote de 30" (0,750 m). La particularidad de este diagrama es que las unidades del caudal del sople y la producción se encuentran expresadas con relación al área transversal del cubilote en las toberas. El resultado es que se puede verificar que existen unas condiciones de operación óptimas que proporcionan las mejores condiciones de temperatura del metal y producción.

El diagrama de red modificado desarrollado por Rehder se construye con base en la misma

información que los generalizados, con la diferencia de que la producción se ubica en el eje *Y* del diagrama y el caudal del sople en el eje *X*, lo que produce que la relación carbono-metal se convierta en una línea recta y que la temperatura del metal conserve la misma curvatura, haciendo que el diagrama pueda utilizarse e interpretarse mucho más fácilmente.

Por último el diagrama de red simplificado, el cual fue introducido en 1982 y tiene como característica principal que las variables controlables de la operación se encuentran en los ejes *X* (caudal del sople por unidad de área del cubilote) y *Y* (relación carbono-metal), lo que lo hace más fácil de utilizar que las otras presentaciones.

En cualquiera de los casos cuando los diagramas de red van a utilizarse bajo condiciones diferentes a las de la información obtenida para su construcción, es decir cuando el diámetro del cubilote es diferente y el sople es caliente o enriquecido con oxígeno, se hace necesario realizar ajustes para obtener una información confiable.

Por tanto lo más recomendado es establecer directamente los diagramas de red para cada unidad particular. Sin embargo, esto implica una gran cantidad de experimentos, por lo que la utilización de un *software* de simulación es una buena alternativa.

El software AFS Cupola Model.

Está basado en un modelo matemático termoquímico que describe en forma de ecuaciones diferenciales los balances de masa y energía a lo largo de la altura del horno de cubilote dividiéndolo en 1.000 partes. El modelo fue construido bajo los siguientes supuestos [6]:

1. Es unidimensional, es decir que sólo considera los cambios en la coordenada axial del horno.
2. El sistema es estanco, lo que significa que no existen fugas de los materiales que bajan por la columna de carga, ni de los gases que ascienden por ella.
3. Cada componente de la carga puede caracterizarse por su tamaño, densidad, área específica,

capacidad calorífica y composición química, y estas propiedades permiten variaciones a medida que estos materiales descienden.

4. Cada fase (sólidos, líquidos o gases) se encuentra a la misma temperatura si se encuentra en la misma posición vertical del horno.
5. El hierro y el acero funden a temperaturas constantes.
6. Las pérdidas de calor a través del refractario se presumen como un sumidero convectivo entre

los gases de la combustión y el ambiente. La fuerza impulsora es la diferencia de temperatura entre ambas.

7. El modelo sólo simula operaciones de colada continua y cubilotes con una sola fila de toberas.

Las reacciones que se tienen en cuenta para la formulación del modelo, pueden observarse en la tabla 1 [7]. A cada una de ellas se le asigna una velocidad de reacción, que depende de los mecanismos involucrados en su cinética, las áreas específicas, las constantes cinéticas y los coeficientes de transferencia de masa.

Tabla 1 Reacciones utilizadas para la construcción del *software* AFS Cupola Model [7]

Nombre	Reacción
Combustión	$C + O_2 \rightarrow CO_2$
Boudouard	$C + CO_2 \rightarrow 2CO$
Recuperación de carbono en el metal	$C_{(coque)} \rightarrow C$
Calcinación de la caliza	$CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2$
Fusión de la caliza	$CaO_{(sólido)} \rightarrow CaO_{(fundido)}$
Oxidación del metal sólido	$Fe + CO_2 \rightarrow FeO + CO$
Oxidación del Mn en el metal fundido	$FeO_{(escoria)} + Mn \rightarrow Fe + MnO_{(escoria)}$
Oxidación del Si en el metal fundido	$FeO_{(escoria)} + Si \rightarrow Fe + 0,5 SiO_2$
Oxidación del C en el metal fundido	$FeO_{(escoria)} + C \rightarrow Fe + CO$
Oxidación del SiC	$SiC + FeO \rightarrow Fe + Si + CO$
Disolución del SiC (luego de la oxidación)	$Si_{(fundido)} \rightarrow Si$
Disolución del SiC (antes de la oxidación)	$SiC \rightarrow Si + C$
Gasificación por vapor de agua	$C + H_2O \rightarrow CO + H_2$
Descomposición del SO_2	$SO_2 \rightarrow S + O_2$

Nota. Las especies subrayadas en la tabla indican que se encuentran disueltas en el metal.

Parte experimental

La información experimental se obtuvo en el horno de cubilote de la Universidad de Antioquia, en el

marco del proyecto “Estudio del comportamiento de silicio adicionado como carburo de silicio en el horno de cubilote” [8]. Las características del equipo pueden observarse en la tabla 2.

Tabla 2 Características del horno de cubilote de la Universidad de Antioquia

Parámetro	Dimensión
Diámetro interno	0,310 m
Diámetro exterior en la zona de fusión	0,600 m
Número de toberas	4 en una fila
Diámetro de las toberas	0,054 m
Distancia desde el centro de las toberas hasta la puerta de carga	2,100 m
Distancia desde el centro de las toberas hasta el fondo del horno	0,200 m

El equipo puede trabajar con sople caliente a temperaturas entre 250 y 450 °C y enriquecimiento con oxígeno. En total se tiene información de tres coladas realizadas con refractario básico de magnesita (92,4% de MgO); la relación coque-metal se mantuvo en 0,25, el coque utilizado

posee un carbono fijo de 90,4%. La información se tomó durante los periodos de estabilidad en la operación del horno. En la tabla 3 pueden verse las condiciones del sople en cada colada. Las coladas A y B se realizaron con carga de fundición y la C con carga 50% acero y 50% hierro.

Tabla 3 Condiciones del sople en las coladas experimentales

Colada	Condiciones del sople		
	Caudal [Nm ³ /min]	%O ₂	Temperatura [°C]
A	3,70	14,60	287
B	3,60	14,90	300
C	5,37	11,57	220

Ajuste del software AFS Cupola Model al comportamiento del horno de cubilote de la Universidad de Antioquia

Para realizar el ajuste del *software* se utilizaron los siguientes parámetros intrínsecos:

- P₁, fracción de área de la gota de metal expuesta al gas.

- P₂, fracción de superficie del coque expuesta al gas.
- P₃, fracción de calor de la reacción de combustión que permanece en los gases.

Los valores para los parámetros de ajuste que menor desviación proporcionaron para cada colada pueden verse en la tabla 4.

Tabla 4 Valores de los parámetros de ajuste utilizados para las simulaciones

Colada	Parámetro		
	P ₁	P ₂	P ₃
A	0,55	0,95	0,95
B	0,52	0,95	0,95
C	0,50	0,99	0,95
Promedio	0,52	0,96	0,95

Los valores promedio de los parámetros de ajuste del *software* en la tabla 4, se utilizaron para realizar las simulaciones necesarias para construir los diagramas de red del horno de cubilote de la Universidad de Antioquia. La carga metálica se asumió como 100% fundición.

Resultados

Información experimental versus simulación

Las comparaciones entre los valores reales y los suministrados por el *software* AFS Cupola Model, pueden verse en la tabla 5.

En las coladas A y B los porcentajes de error se encuentran en el intervalo que establece la literatura en lo relacionado con la aproximación

real del *software*. La colada C presenta unos porcentajes de error ligeramente mayores. Los ajustes en general se consideran aceptables.

Tabla 5 Información de la producción y la temperatura del metal en piquera: real, simulada y porcentaje de error

<i>Colada</i>		A	B	C
%C	Real	4,074	4,419	4,311
	Simulada	4,165	4,238	4,023
	%error	0,091	0,181	0,288
Producción	Real	308,000	308,000	359,000
	Simulada	297,000	294,000	396,000
	%error	3,570	4,540	10,310
Temperatura	Real	1,539	1,554	1,477
	Simulada	1,570	1,582	1,576
	%error	2,010	1,800	6,700
%CO ₂	Real	9,720	10,05	11,940
	Simulada	9,813	10,10	11,690
	%error	0,093	0,051	0,246
%CO	Real	39,610	38,71	35,140
	Simulada	43,920	44,130	38,240
	%error	4,311	5,418	3,099

Perfiles obtenidos de las simulaciones

Algunos de los perfiles de temperatura, composición de gases y porcentaje de carbono en el metal, con respecto a la coordenada axial del horno se pueden ver en las figuras 1, 2 y 3.

Temperatura de los gases (figura 1). A nivel de las toberas la temperatura de los gases es igual a la temperatura del aire del sople. Cuando el oxígeno entra en contacto con el coque incandescente ocurre la reacción de combustión, incrementando de forma significativa la temperatura, cuyo valor máximo depende de las condiciones del sople. El cambio en la pendiente ocurre debido a tres factores: cesa la reacción de combustión debido a que ya no hay suficiente oxígeno, la reacción de gasificación comienza a ser importante y la transferencia de calor entre las fases comienza a ser significativa. La temperatura de los gases sigue disminuyendo desde la zona de precalen-

tamiento hasta la puerta de carga debido a la transferencia de calor. El pequeño cambio en la pendiente que ocurre en los perfiles entre 1,0 y 1,1 m se debe a la calcinación de la caliza, la cual es endotérmica.

Temperatura del coque y del metal (figura 1). Debido a la manera como está planteado el modelo matemático, los perfiles de temperatura del coque y del metal son iguales hasta que todo el metal se ha fundido. Esto es una simplificación del fenómeno real ya que tanto las áreas, como los coeficientes de transferencia de calor de estos materiales son diferentes. En la puerta de carga, la temperatura de los sólidos es la temperatura de entrada (28 °C), la temperatura aumenta a medida que la carga descende debido al intercambio de energía con la fase gaseosa. Entre 1,0 y 1,1 m ocurre la calcinación de la caliza, que produce una ligera disminución en la temperatura. A continuación se presenta una meseta a 1.154 °C

entre 0,45 y 0,55 m por encima de las toberas que corresponde al cambio de estado del hierro, es allí donde comienza la zona de fusión; la longitud de esta meseta depende de la cantidad de hierro fundido en la carga. Cabe recordar que el modelo supone que la temperatura de fusión del hierro es única; cuando en realidad existe un intervalo que depende de la composición química, es por este motivo que se presenta la meseta antes mencionada.

Cuando todo el metal se ha fundido, comienza la separación entre el perfil de temperatura del

coque y el del metal. La temperatura del coque aumenta significativamente en la zona cercana a las toberas debido a la reacción de combustión, luego disminuye debido al avance de la reacción de gasificación por dióxido de carbono, el cambio en la pendiente ocurre cuando la gasificación termina y sólo ocurre el intercambio de calor entre las fases. La temperatura del metal es menor que la del coque debido a que la entalpía de esta fase en esta zona depende esencialmente de la transferencia de calor y no de las reacciones que ocurren en la interfase del metal.

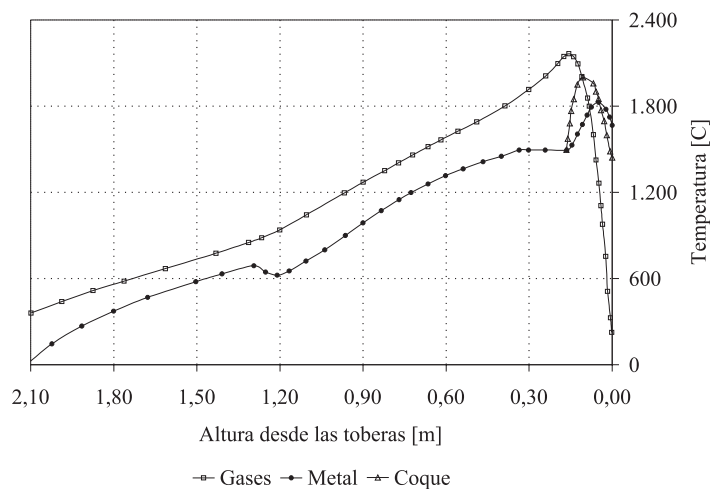


Figura 1 Perfiles de temperatura de los gases, el metal y el coque obtenidos con el *software* AFS Cupola Model para la colada A

Perfil de composición de los gases (figura 2). El oxígeno se consume de forma rápida en la zona cercana a las toberas, generando dióxido de carbono cuya fracción molar aumenta significativamente, hasta el punto en donde comienza a ser importante la reacción de gasificación. Hasta allí se puede considerar la zona de oxidación, la cual está comprendida de acuerdo con la simulación entre las toberas y un máximo de 0,1 m. La zona de reducción superior va desde este punto hasta aproximadamente 0,6 m por encima de las toberas, allí las fracciones molares de monóxido de carbono son mayores. Los perfiles sólo presentan de allí en adelante una variación entre 1,0 y 1,1 m,

en donde ocurre la descomposición de la caliza la cual genera dióxido de carbono. La posición a la cual ocurre esta descomposición depende del perfil térmico.

Perfiles de carbono en el hierro. La colada C se realizó con fundición blanca y acero como materiales de carga, ambos lógicamente con composiciones químicas diferentes, por tanto se presentan dos perfiles en la figura 3. Las reacciones que influyen en el contenido de carbono en el metal, son más importantes cuando éste se encuentra fundido. En ese momento comienzan la carburación y la oxidación de manera simul-

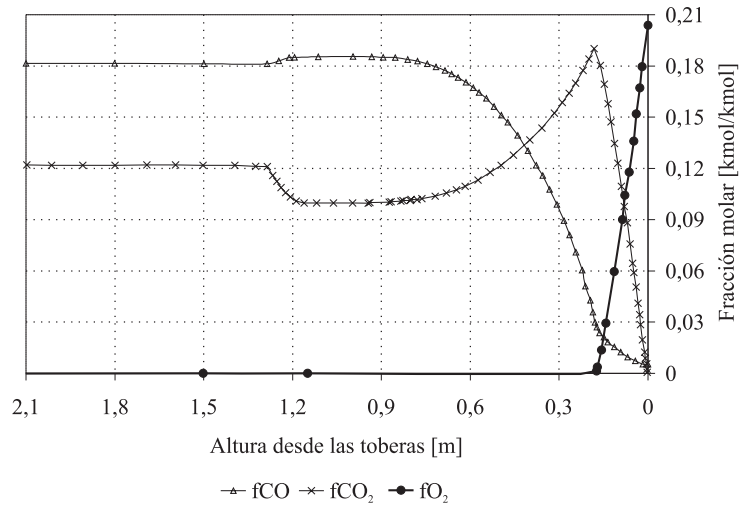


Figura 2 Perfiles de las fracciones molares de los gases obtenidos con el *software AFS Cupola Model* para la colada A

tánea. En el hierro, la fuerza impulsora para la carburación es baja debido a que los porcentajes de carbono y silicio en el metal son altos y la temperatura es baja (bajo carbono equivalente de saturación), mientras que para la oxidación la fuerza impulsora es alta. El resultado es que en las zonas más alejadas de las toberas ocurre una pérdida neta de carbono, hasta que los contenidos son lo suficientemente bajos y la temperatura tan alta, que comienza la carburación, lo que explica

el cambio en la pendiente para los perfiles del porcentaje de carbono en el hierro.

Para el perfil del porcentaje de carbono en el acero, la situación es la contraria. La fuerza impulsora para la carburación es alta, debido al bajo contenido de carbono y silicio y la temperatura es alta, por tanto el carbono equivalente de saturación también lo es. El resultado es que luego de que el acero se ha fundido comienza la carburación.

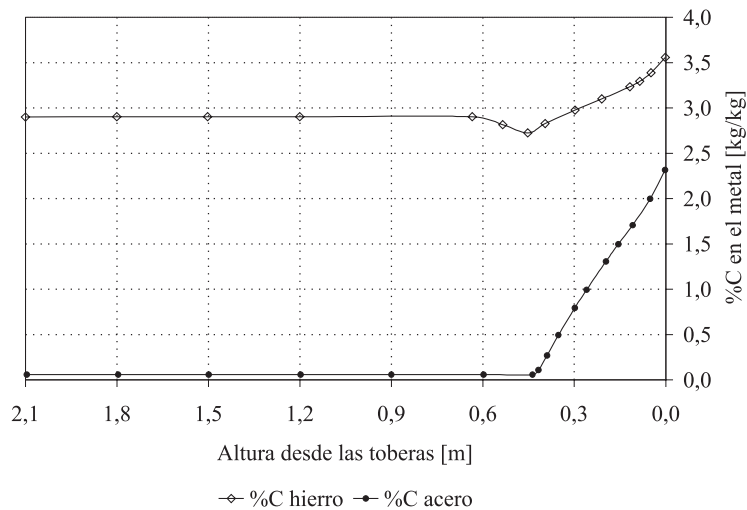


Figura 3 Perfiles del porcentaje en peso de carbono en el metal obtenidos con el *software AFS Cupola Model* para la colada C

Diagramas de red

En la figura 4 se muestra el diagrama de red generalizado que se construyó con ayuda del *software* para el horno de cubilote de la Universidad de Antioquia. Las relaciones carbono metal se refieren a la relación entre la cantidad de carbono en el coque y el metal cargado, la cual se calculó teniendo en cuenta

el contenido de carbono fijo en el coque utilizado. El caudal de aire en el sople y la producción están referidos al área transversal del horno a nivel de las toberas, por lo tanto los diagramas obtenidos son del tipo generalizado. El enriquecimiento con oxígeno se calculó por la técnica de enriquecimiento por oxígeno suplementario.

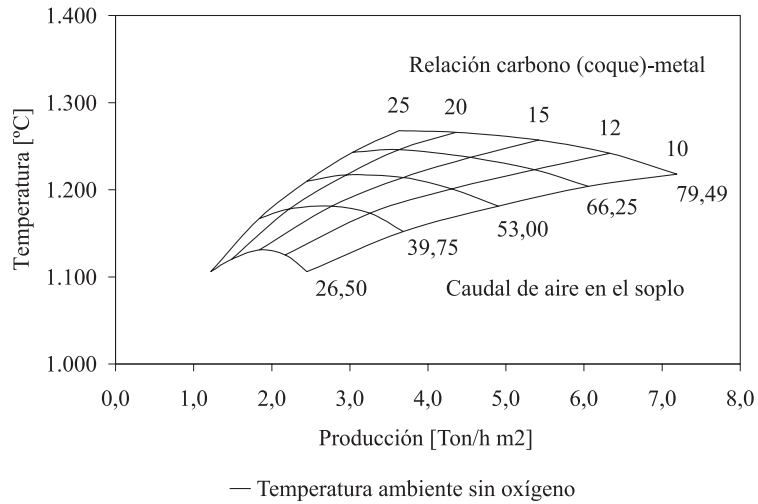


Figura 4 Diagrama de red generalizado para el horno de cubilote de la Universidad de Antioquia sople a temperatura ambiente sin enriquecimiento con oxígeno

En las figura 5 y 6 se observa el comportamiento del diagrama de red cuando se precalienta el

aire del sople y cuando se utiliza oxígeno para enriquecerlo.

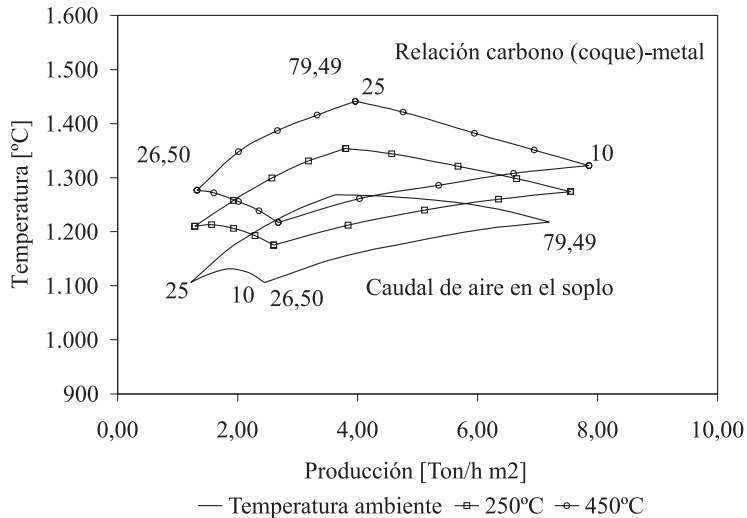


Figura 5 Comportamiento de los diagramas de red en relación con la temperatura de entrada del sople

En ambos casos se puede observar cómo aumentan la producción y la temperatura del metal en piquera cuando se implementan cualquiera de las

dos estrategias, lo que provee mayores posibilidades en cuanto a productividad y calidad.

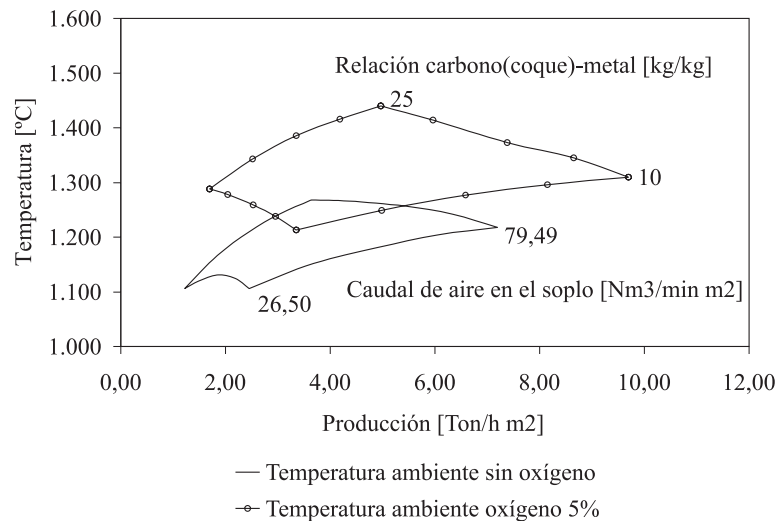


Figura 6 Efecto del enriquecimiento con oxígeno del soplo en los diagramas de red

Los valores que se obtendrían con las redes correspondientes a las condiciones de trabajo de los datos experimentales pueden calcularse realizando de nuevo las simulaciones, con el valor

de los parámetros de ajuste promedio, en lugar de los valores particulares inicialmente utilizados. La tabla 6 muestra los resultados obtenidos en este sentido.

Tabla 6 Porcentajes de error obtenidos con los diagramas de red

Colada	Producción			Temperatura		
	Real	Red	% error	Real	Red	% error
A	308	299	3,96	1.539	1.519	1,3
B	308	295	3,91	1.554	1.528	1,67
C	359	389	5,15	1.477	1.670	13,07

Conclusiones

Las desviaciones de la información experimental con respecto a las simulaciones para el ajuste del *software* son aceptables, aun cuando en la colada C la desviación de la temperatura se encuentra por encima de lo que reporta la literatura en lo que al AFS Cupola Model se refiere.

En cuanto a los valores de los parámetros de ajuste, estos se encuentran dentro de un intervalo acorde con su significado físico.

Los perfiles de temperatura de los gases, el metal y el coque, así como los perfiles de composición química de los gases y el metal están de acuerdo con los fenómenos que ocurren durante el proceso de fusión en el cubilote.

El comportamiento de los diagramas de red está de acuerdo con el comportamiento del horno de cubilote y aunque la desviación en la temperatura para la colada C es alta (está desviación se atribuye a que los diagramas se construyeron para cargas de solo fundición y la colada 5 tiene en su carga 50% de acero), las mallas obtenidas pueden utilizarse como una herramienta de planeación de la operación del horno de cubilote de la Universidad de Antioquia para operaciones con refractario de magnesita.

Se hace evidente mediante las comparaciones de las redes a diferentes temperaturas del soplo y enriquecimientos con oxígeno, la ventaja de trabajar con este tipo de mejoras, lo que fortalece la necesidad de que las empresas del sector de la fundición con este tipo de hornos implementen la utilización de estas técnicas, en aras de mejorar la productividad y la calidad de sus operaciones.

Esta metodología de construcción de los diagramas de red es una gran alternativa para las industrias, ya que permite obtenerlos para un cubilote en particular, sin necesidad de realizar gran cantidad de experimentos, con el beneficio económico que de ello se desprende.

Referencias

1. K. Seymour, S. Vladimir, C. F. Landefeld, M. Bauer. "The AFS Cupola Process Model: A Computer Tool for Foundries". *Modern Casting*. Vol. 89. 1999. pp. 41-44.
2. R. Aristizábal. *Modelo matemático para un horno de cubilote: comportamiento de la combustión y los materiales de carga*. Informe final proyecto de investigación para optar al título de magister en Ingeniería. Medellín. Universidad de Antioquia. 2004. pp. 4.2-4.3.
3. A. A. Baquero. *Diseño, operación y control del cubilote*. 1.^a ed. Bucaramanga. Ed. UIS. 2000. pp. 138-147.
4. S. Katz. "The AFS-DOE Cupola Process Model". *The second International Cupola Conference Proceedings*. Cincinnati Ohio. October 7-9. 1998. pp. 123-127.
5. American Foundry Society. *AFS Cupola Handbook*. Estados Unidos. AFS. 6^a ed. 1999, pp.12.6-12.7.
6. V. Stanek, B. Q. Li, J. Szekely. "Mathematical Model of a Cupola Furnace-Part 1: Formulation and an Algorithm to Solve the Model". *AFS Transactions*. Vol.100.1992. pp. 425-437.
7. *Software AFS Cupola Model*. AFS. USA. 1999.
8. H. D. Mejía, R. Aristizábal, C. Silva. *Estudio del comportamiento del silicio adicionado como carburo de silicio en el horno de cubilote*. Proyecto CODI de investigación aplicada. Medellín. Facultad de Ingeniería. Universidad de Antioquia. 2002.