

Modelo matemático basado en aprendizaje de máquina para la predisposición automática del flujo de cal y hrd en hornos eléctricos

Marlon Rojas

<https://orcid.org/0000-0002-1065-7992>
Marlonrj@gmail.com
UNEXPO, Vice Rectorado Puerto Ordaz
Estado Bolívar, Venezuela

Olga Prado

<https://orcid.org/0000-0002-8003-2904>
Herpra7@gmail.com
SIDOR
Estado Bolívar, Venezuela

Alejandro Zambrano

<https://orcid.org/0000-0002-7465-8636>
Alejandro.zambrano@gmail.com
SIDOR
Estado Bolívar, Venezuela

Octavio Carvajal

<https://orcid.org/0000-0002-6055-8511>
sirocc@gmail.com
SIDOR
Estado Bolívar, Venezuela

Recibido (08/07/21), Aceptado (10/08/21)

Resumen: En este trabajo se desarrolla un modelo matemático para la predisposición automática del flujo de cal y HRD durante el proceso de aceración primaria en HEA de la acería de planchones de Sidor, C.A. Modelo que fue posible a través de un sistema de control inteligente de proceso dinámico, bajo un perfil de investigación de campo del tipo descriptivo; considerando una muestra de 46 coladas de acero de calidad comercial (ASTM A 1018). El sistema está conformado por dos módulos de simulación que permite asegurar la condición termodinámica ideal (temperatura del acero entre 1535 a 1575°C, indicador ITHD menores a 1,5% y un índice de basicidad binaria de la escoria entre 2 a 2,6) para la protección del material refractario y desfosforación del acero. Teniéndose como resultado, una reducción del Tap To Tap del 7,08%; reducción del consumo de cal en 5,28% y un aumento de la productividad del 7,51%.

Palabras Clave: Metalurgia Primaria; Horno de Arco Eléctrico (HEA); Modelo Matemático; Aprendizaje de Máquina.

Machine learning mathematical model for the automatic setup of the cal and hrd flow during the process of primary aceration in electric ovens

Abstract: In this work, a mathematical model is developed for the automatic predisposition of the flow of lime and HRD during the primary steeling process in HEA of the steel mill of Sidor, C.A. Model that was possible through an intelligent dynamic process control system, under a descriptive field research profile; considering a sample of 46 commercial grade steel castings (ASTM A 1018). The system consists of two simulation modules that ensure the ideal thermodynamic condition (steel temperature between 1535 to 1575 ° C, ITHD indicator less than 1,5% and a binary base index of the slag between 2 to 2,6) for the protection of refractory material and dephosphorization of steel. Having as a result, a reduction of the Tap To Tap of 7,08%; reduction of lime consumption by 5,28% and an increase in productivity of 7,51%.

Keywords: Primary Metallurgy; Electric Arc Furnace (HEA); Mathematical Model; Machine Learning.

I. INTRODUCCIÓN

A nivel mundial, según la Asociación Latinoamericana del Acero (ALACERO) [1] existen dos tecnologías alternativas que pueden seguir las empresas siderúrgicas para fabricar acero, que son: acería integral y acería eléctrica; siendo esta última la que se emplea en Venezuela; específicamente, en SIDOR durante su proceso productivo. Dicha tecnología consiste en utilizar hornos de arcos eléctricos (HEA) en la fase inicial de producción de acero denominada aceración primaria, en donde la carga metálica (HRD y chatarra) es fundida al hacer contacto con los arcos eléctricos generados por los electrodos de grafito a través del paso de corriente eléctrica.

Una vez que la carga metálica es fundida, se obtienen como producto acero líquido que pasa a la segunda fase de producción denominada afino o metalurgia secundaria, en donde se logra obtener tanto la composición química final del producto, como la temperatura final a la cual empieza el proceso de solidificación. Las coladas de acero antes de llegar a la etapa de afino tienen que lograr cumplir con cierta especificación en su composición química, siendo de especial interés el control del porcentaje en masa del fósforo (P), ya que según [2] tiene un efecto fragilizante sobre la estructura del acero con una marcada disminución de la tenacidad. Por ello, [3] indica que el P se especifica como elemento aleante solo en pocos grados, y más que todo, para aumentar la dureza y la resistencia a la corrosión atmosférica del acero.

Para disminuir el P en el acero, [4] y [5] señalan que es necesario añadir cal mezcla, el cual actúan como fundente que aporta óxido de calcio (CaO) que reacciona químicamente con el P para formar fosfatos estables que permanecen en la escoria, la cual posteriormente es retirada del proceso. Sin embargo, en la escoria también hay sílice (SiO₂) que es aportada por la materia prima HRD y que el mismo compite con el P por el CaO disponible para mantener la basicidad de la escoria, y con ello aumentar el tiempo de vida útil del horno.

En este sentido, la cal mezcla que se utilice en el proceso de aceración primaria, debe ser consumida de manera eficiente que permita cumplir con ambas condiciones señaladas anteriormente. Lo que resulta difícil, por la ausencia de un sistema de control inteligente automático en el proceso que a partir de medidas cuantitativas, permita en tiempo real, la supervisión, monitoreo y acción de control sobre las variables físicas involucradas en la operación. Problema que se intensifica aún más con el hecho de que la adición de dichas materias primas se realiza mediante prácticas operativas totalmente empíricas. Es decir, están basadas en la experiencia y experticia que tienen los operadores sobre el proceso y que además desconocen el dato real de la composición química del HRD; especialmente, el porcentaje en masa del SiO₂, el cual tiende a ser muy variable hoy en día.

Esta falta de uniformidad en la operación, causa variabilidad en el consumo de cal mezcla, situación que trae como consecuencia que en el momento que su consumo sea en exceso; es decir, mayor al requerido, se estaría produciendo una colada de acero líquido a un costo elevado por el alto consumo de cal. Por otro lado, en el momento que el consumo de cal sea déficit; es decir, menor al requerido, se tiene como efecto que se alarguen los tiempos de procesamiento del acero, para así poder cumplir con los atributos de calidad, lo que causa disminución en la productividad, aumento del consumo energético y disminución en el tiempo de vida útil de servicio de los equipos utilizados en el proceso.

Es por ello que en busca de la mejora continua, se ha desarrollado un modelo matemático para la predisposición automática del flujo de cal mezcla y flujo de HRD durante el proceso de aceración primaria en HEA de la acería de planchones de SIDOR. De tal manera que se disponga de una única práctica de operación con un alto nivel de confianza que pueda ser fácilmente seguida por los fundidores, para seguir garantizando la calidad del producto final con un consumo eficiente de las materias primas, independientemente, de la variabilidad que estuviese presentando en su composición química.

Modelo que fue posible empleando técnicas de control inteligentes, herramienta que se ha venido incrementado en los últimos años, ya que como señala [6], se ha demostrado ser un recurso estratégico que a partir de los mecanismos de procesamiento de información de los humanos, permite resolver problemas particulares o complejos en ambientes cambiantes; como lo representa los sistemas dinámicos. Esto, dado que en la automatización se programan diversos elementos computacionales que permiten verificar, monitorear y supervisar los valores de las variables principales involucradas dentro de un proceso, que en función de un rango operativo confiable y una serie de reglas permitirá tomar decisiones en tiempo real, lo que en efecto reduce la necesidad de la intervención del personal en los procesos, quienes pueden incurrir en errores humanos. Es por ello, que la optimización de los hornos de arco eléctrico se ha abordado principalmente a través de modelos basados en técnicas de control inteligentes; siendo la técnica de red neuronal artificial (ANN, por sus siglas en inglés) la que ha tenido mayor aplicación en este campo.

El éxito del uso de la técnica de ANN para modelar el comportamiento no lineal y variante en el tiempo del proceso de fabricación de acero en un horno de arco eléctrico, según [7], se debe, a que estos modelos infieren el resultado a partir de datos obtenidos directamente del proceso, los cuales son utilizados para el entrenamiento de la red neuronal; lo que sin duda alguna, proporciona un modelo razonablemente exacto, siendo el proceso de aceración primaria en HEA un ejemplo claro y propicio para aplicar este tipo de técnica.

Son contados, por no decir pocos, las investigaciones que se han realizado con respecto a la aplicación de las técnicas inteligentes para el control del proceso de aceración primaria con la tecnología de HEA, y que además, las mismas están enfocadas más que todo al control y regulación del posicionamiento de los electrodos mediante la técnica de ANN, que si bien es cierto, evidencian que este tipo de técnica tiene gran aplicación y beneficio para el control de dicho proceso dinámico; también es cierto, que representan una idea vagamente relacionada con el problema en estudio; es decir, aún no se tiene evidencia hasta el momento en que este tipo de técnica inteligente, haya sido utilizada y/o implementada para controlar de forma automática la adición de materias primas durante el proceso de aceración primaria con la tecnología de HEA. De modo que, el presente proyecto investigativo implica un tema poco estudiado que no ha sido abordado antes. Lo que, sin duda alguna, hace que dicho estudio sea considerado como un producto investigativo tecnológico de gran relevancia en el área de la siderurgia y computación Inteligente.

II. METODOLOGÍA

A. Modelo de Simulación: Predisposición de Flujo de Cal

Para predisponer el flujo de cal mezcla durante el proceso de aceración primaria en el HEA, se utilizó el modelo desarrollado por [8] y a modo de validación en su estimación, se procedió a realizar algunas pruebas experimentales a través de un simulador desarrollado. Dichas pruebas se llevaron a cabo en dos períodos: Turno N° 1 y Turno N° 2. En el turno N° 1, un día previo a las pruebas se realizaron los siguientes pasos:

- Se recolectó una muestra especial del material (HRD y cal mezcla)

- Se envió la muestra recolectada en el punto anterior, al laboratorio de materias primas, identificadas como muestras especiales, para su posterior análisis químico.

En el turno N° 2, una vez que se haya introducido la carga metálica y conectado el horno eléctrico, para la fabricación de aceros en estudio, se llevaron a cabo los siguientes pasos:

- Se introduce en el modelo de simulación desarrollado, el dato de la composición química del HRD y cal mezcla de las muestras recolectadas en el turno N° 1.

- Se ajusta el índice de basicidad binaria objetivo en el modelo según el tipo de acero a fabricar

- Se introduce en el modelo de simulación, el flujo de HRD establecido por el técnico de aceración (fundidor) durante el proceso de aceración primaria.

- Se indica al fundidor el flujo de cal mezcla estimado por el modelo, para que proceda a suministrar dicha cantidad en el proceso.

- Una vez superadas las 190 toneladas de carga total en la colada actual del experimento, se procede a medir la temperatura, la actividad de oxígeno, recolectar muestra de acero y muestra de escoria.

B. Modelo de Simulación: Predisposición de Flujo de HRD

Para el desarrollo de este modelo, primeramente, se seleccionó el patrón de datos que contenían todas las variables requeridas; pertenecientes a una colada de acero que se fabricó con el más alto nivel de eficiencia. Luego, se procedió a realizar el entrenamiento de la red, siguiendo los siguientes eventos:

- Se definió una arquitectura de la red neuronal empleada en sistemas dinámicos. En este caso, la arquitectura adoptada para la simulación, es del tipo neuronal auto-regresivo con entradas exógenas (NARX). Este tipo de red según lo indicado por [9], posee una conexión en serie-paralelo, lo que significa que salida de la red será retroalimentada con retardo como entrada a la primera capa de neuronas que integra la red neuronal.

- Se realizó el algoritmo de aprendizaje de la red (principio de Levenberg Marquardt), haciendo uso de la herramienta MATLAB.

- Luego se especificaron los valores iniciales (número de capas de la red, número de neuronas y

-funciones de activación entre las capas) y los valores paramétricos de aprendizaje (Goal, Epochs, Lr y Mínimo Gradiente).

-Se realizó la corrida del modelo en el software MATLAB.

-Se midió el error de aprendizaje y el error de generalización, con el fin último de ir ajustando en la medida que se alcance los objetivos y de esta manera se estableció la arquitectura de la red deseada en el modelo matemático.

-Finalmente, se procedió a extraer el modelo matemático obtenido con el entrenamiento de la red neuronal.

C.Recolección de Datos: Pruebas Fuera de Línea

-Se programaron los modelos de simulación.

-Se recolectaron de la base de datos históricos, los datos requeridos en los modelos de simulación para su operación.

-Con los datos recolectados, se realizaron las simulaciones en los modelos matemáticos desarrollados.

-Luego se realizaron gráficos de control, para comparar los datos estimados por el modelo con el dato real.

III.RESULTADOS

A.Modelo de Simulación: Predisposición de Flujo de Cal.

El modelo de predisposición de cal mezcla que se empleó fue justificado y desarrollado por [8], dicho modelo tiene como objetivo estimar el flujo de cal para mantener el índice de basicidad binaria de la escoria en un rango estrecho durante el proceso de aceración primaria en el horno eléctrico independientemente de la composición química que posea tanto el HRD como la cal. La formulación matemática está dada por la siguiente ecuación:

$$\dot{M}_{CAL} = \dot{M}_{HRD} \left[\frac{B_2(SiO_2)_{HRD} - (CaO)_{HRD}}{(CaO)_{CAL} - B_2(SiO_2)_{CAL}} \right] \quad (1)$$

Siendo; M_{CAL} , flujo másico de cal (ton/h); M_{HRD} , flujo másico de HRD (ton/h); B_2 , índice de basicidad binaria de la escoria; $(SiO_2)_{HRD}$, contenido de SiO_2 en HRD (%); $(CaO)_{HRD}$, contenido de CaO en HRD (%); $(SiO_2)_{CAL}$, contenido de SiO_2 en la Cal (%) y $(CaO)_{CAL}$, contenido de CaO en la Cal (%).

Luego, se realizó una experimentación con el fin último de establecer un rango de operación del índice de basicidad binaria de la escoria a fijar en el modelo, que a su vez depende de las condiciones operativas del proceso y del tipo de acero a fabricar en el horno eléctrico. Con respecto a la protección del material refractario, se debe tener en cuenta que la misma se logra, siempre y cuando se minimice un desgaste acelerado causado por el ataque químico de los óxidos ácidos y por la radiación del arco eléctrico. Para asegurar que el material refractario minimice el ataque químico, la escoria a formar durante el proceso de aceración primaria en el horno eléctrico tiene que poseer características básicas; para ello, [10] indican que el mismo se consigue apuntando a un índice de la basicidad binaria de la escoria mayor e igual a 1.

Para minimizar el desgaste del material refractario por causa de la radiación del arco eléctrico, es necesario formar una adecuada escoria espumosa, para cubrir el arco eléctrico generado por los electrodos. Al considerar el indicador ITHD como variable de referencia para medir la espumosis de la escoria, se encontró que las mejores condiciones de formación de escoria espumosa que mantuvieron valores de ITHD dentro de rango de estabilidad (menores a 1,5%) establecido en [11] y [12], se obtuvieron en coladas de acero cuyo proceso de fabricación mantuvieron un índice de basicidad binaria de la escoria entre 2 y 2,6 (véase Fig.1).

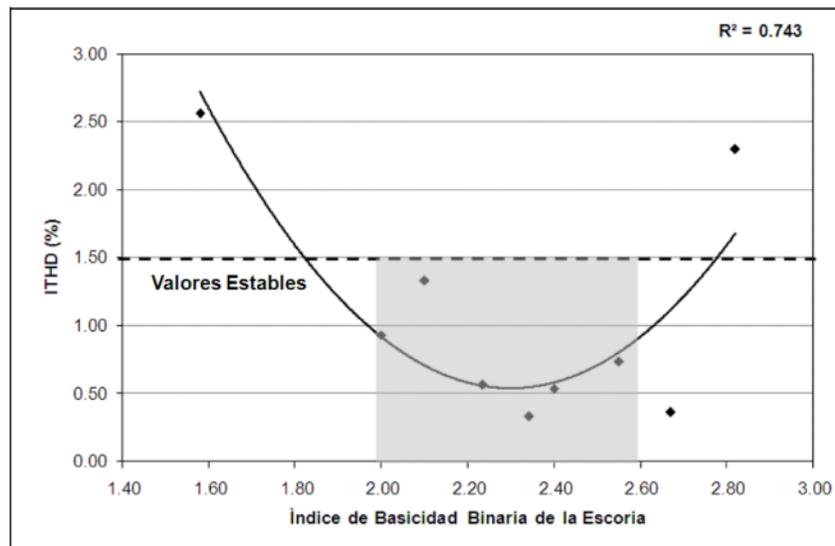


Fig. 1. Relación de índice de basicidad binaria de la escoria con el indicador ITHD.

Esto se explica, dado que, en procesos reales de fabricación de acero, la espumabilidad de la escoria se logra con la generación de grandes volúmenes de burbujas de monóxido de carbono (CO), productos de reacciones químicas que compiten simultáneamente. Estas burbujas se desprenden del líquido y al atravesar la escoria, producen su espumado. Sin embargo, [13] asegura que la generación de grandes volúmenes de burbujas de CO solo representa una condición necesaria pero no suficiente para lograr la formación de una escoria espumosa estable, pues también debe cumplirse una segunda condición que consiste en mantener buenas propiedades físicas en la escoria, como alta viscosidad superficial, baja densidad y baja tensión superficial. Propiedades que según [14] se logra incrementando el índice de basicidad binaria de la escoria y disminuyendo la temperatura; pues, disminuye el límite de saturación de los óxidos básicos en la escoria como los son: CaO y MgO.

La saturación en ambos compuestos, garantiza a su vez, la formación de precipitados de segunda fase sólidas, como los son Ca_2SiO_4 y magnesita-wüstita, que son esenciales para una adecuada espumación de la escoria. Bajo este contexto, [15] indica que la estabilidad de la escoria espumosa lograda con los precipitados de segunda fase sólidas, se debe a que dichos elementos tienen una tensión superficial menor que la matriz de escoria insaturada, actuando como núcleos mejorando así la adsorción y retención de burbujas de CO generadas.

En la Fig. 1, también se puede notar que un aumento excesivo de las partículas sólidas (con el incremento de del índice de basicidad binaria), genera una disminución en el espumado de la escoria, en donde las paredes refractarias del horno quedarían totalmente expuestas a la radiación del arco eléctrico generado por los electrodos. Este comportamiento fue estudiado por [16], donde revela que es debido a dos condiciones: una alta basicidad de la escoria y bajo intervalo de solidificación de las partículas suspendidas.

Ambas condiciones se tienen que satisfacer, pues al aumentar la basicidad de la escoria, disminuye la fluidez de la misma, que traduce en dificultad de movimiento de las partículas. Pero, si el intervalo de solidificación de estas partículas es bajo, estas se mantienen menos tiempo en estado semilíquido, por lo que solidifican con gran facilidad. Esto conlleva a un aumento de partículas solidificadas en la superficie del baño, y finalmente un aumento de la viscosidad, lo que tiende a producir una escoria sólida con pocos beneficios metalúrgicos y poca o ninguna protección al refractario. Bien lo plantea [11] en señalar que una escoria parcialmente líquida está conformada por una fracción líquida y una fracción sólida. Mientras mayor sea la fracción sólida, la fluidez de la escoria disminuye y cambia de “cremosa” a “espumosa”, y eventualmente a “costrosa” o “sólida”.

Por el contrario, la adición de muy poco óxido refractario; es decir, valores bajos del índice de basicidad binaria de la escoria, produciría una escoria muy fluida con pocos beneficios metalúrgicos y altamente agresiva para el refractario. De modo, que manteniendo un índice de basicidad binaria en un rango comprendido entre 2 y 2,6 durante el proceso de aceración primaria en el horno eléctrico, según el análisis anterior resulta la mejor opción para minimizar el desgaste prematuro del material refractario. También se encontró que a través de dicho rango de operación del índice de basicidad, se garantiza una disolución del P en el acero dentro de las especificaciones de

calidad del producto, que para el tipo de acero en estudio (ASTM A 1018), el porcentaje en masa del P máximo permitido es 0,019% (ver Fig. 2). Como es de esperarse, a mayores índices de la basicidad de la escoria menor será la disolución del P en el acero líquido, ya que se aumenta el contenido de CaO en la escoria, que reacciona químicamente con el pentóxido de fósforo (P_2O_5 , producto de la oxidación del fósforo), para formar fosfatos estables que permanecen en la escoria. Para una mayor apreciación véase la Fig. 3, donde claramente se muestra el efecto que tiene el contenido de CaO de la escoria en el P disuelto en el acero, descrito anteriormente.

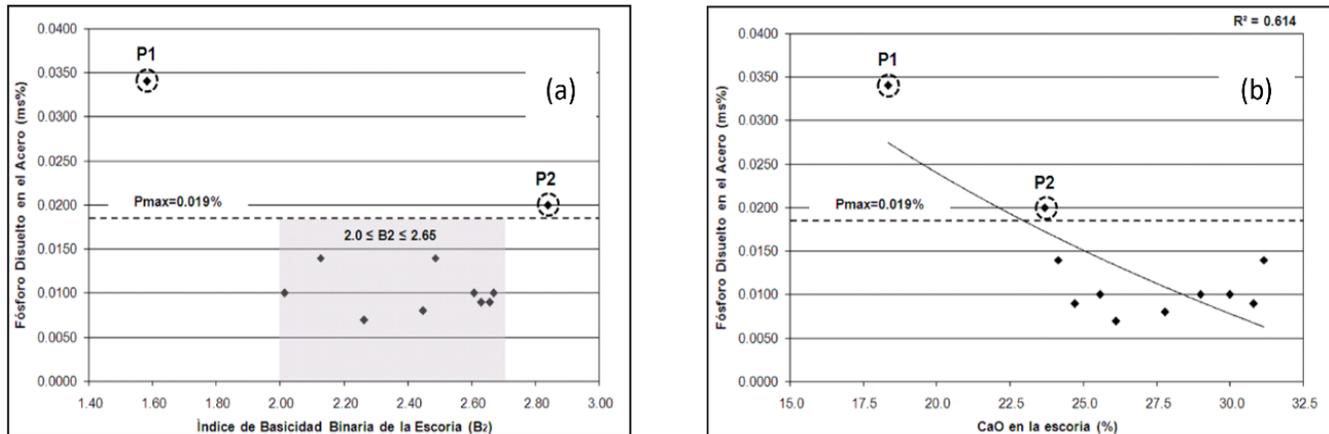


Fig. 2. Relación del P disuelto en el acero con: (a) índice de basicidad binaria de la escoria y (b) contenido de CaO en la escoria.

Tanto en la Fig. 2.a, como la Fig. 2.b, se identificaron dos puntos (P1 y P2), los cuales se encontraron por encima de la especificación máxima permitida del P disuelto en el acero. Siendo el punto P2, el que más ruido hace dentro del análisis, pues para dicho punto el índice de basicidad de la escoria fue mayor en comparación al resto de los datos y además el contenido de CaO en la escoria estuvo muy similar en aquellos puntos donde el P disuelto en el acero se encontró dentro de la especificación.

Al analizar en detalle las condiciones termodinámicas por las cuales se obtuvieron los puntos P1 y P2, se encontró que en ambos casos la temperatura en el acero fue relativamente superior en comparación con el resto de los datos, tal y como se visualiza en la Fig. 3, en donde a medida que se aumenta la temperatura del acero mayor será la disolución del P en el mismo; pues, la energía libre de Gibbs de la reacción de desfosforación aumenta, en magnitud positiva por lo que el fosfato de cal tiende a ser menos estable, permitiendo así, la liberación del pentóxido de fósforo (P_2O_5) de la escoria y este puede ser reducido por el carbono y/o el hierro disuelto en el acero líquido. Es por este motivo, que el punto P2, se obtuvo un P disuelto en el acero fuera de especificación a pesar de haber mantenido un índice de basicidad binaria de la escoria dentro del rango de estabilidad. Este efecto también ocurre con el punto P1, solo que este tiende a ser mucho más significativo; pues a parte de poseer una alta temperatura ($1642^{\circ}C$), el índice de basicidad binaria de la escoria se mantuvo relativamente bajo (1,58) y el contenido de CaO en la escoria fue de 18,38%; condiciones termodinámicas que no son las más óptimas para beneficiar la desfosforación del acero.

Por el contrario, la mejor opción para beneficiar la desfosforación del acero es mantener una basicidad binaria entre 2 y 2,60 y además mantener la temperatura del acero en un rango comprendido entre 1530 y $1570^{\circ}C$. Bajo estas condiciones fue que se obtuvo un elevado coeficiente de distribución del fósforo entre la escoria y el acero, dentro de las especificaciones del producto, además de garantiza los requisitos principales de protección del material refractario (con una adecuada formación de escoria espumosa), tal y como se aprecia tanto en la Fig. 2, como en la Fig.3.

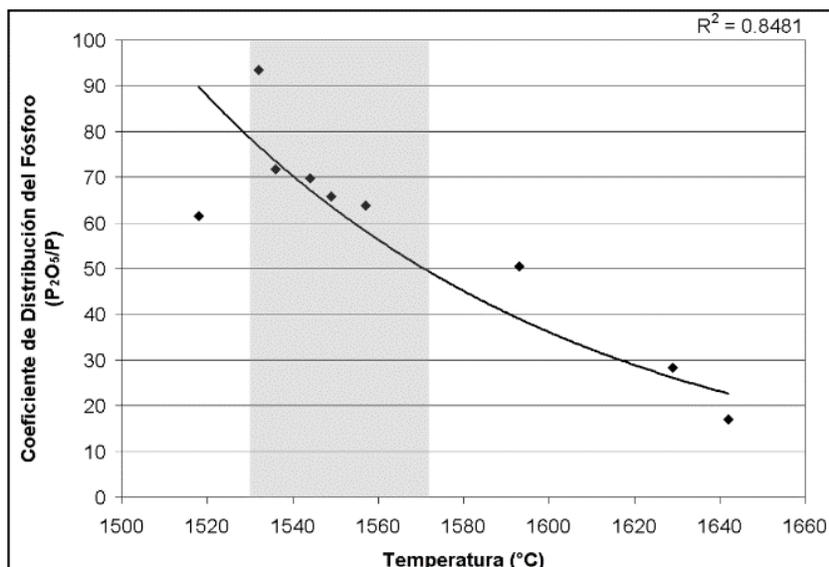


Fig. 3. Efecto de la temperatura en el coeficiente de distribución del fósforo entre la escoria y el acero.

B.Experimentación con el Modelo de Cal Mezcla

El sistema integral del modelo, está concebido de tal forma, para que el índice de basicidad binaria de la escoria se controle a través del modelo de predisposición del flujo de cal mezcla y para ello, es necesario disponer en línea del dato de la composición química tanto de la materia prima HRD como de la cal mezcla por colada de acero a fabricar. Pues, solo se disponen de una muestra que se recolecta de forma especial en el turno N°1 y al operar el modelo con dicho dato, considerando que el mismo se mantiene invariante en el tiempo, se pierde precisión en la estimación arrojado por el modelo.

A manera de validación, en la Fig. 4, se muestra una comparación entre flujo de cal estimado con el modelo mediante la química de la muestra recolectada en el turno N° 1 (siendo este flujo el empleado por los fundidores) y el flujo de cal estimado con el modelo mediante la química de la muestra recolectada en el turno N° 2, durante la etapa fusión del proceso de aceración primaria en HEA. Como se puede notar existe una diferencia entre ambos flujos estimados por el modelo, el cual se debe al porcentaje de SiO₂ contenido en el HRD, pues en la muestra recolectada en el turno N° 1, fue de 3,9%, mientras que por el contrario en la muestra recolectada en el turno N° 2, fue de 3,5% (siendo esta química correspondiente a la colada en producción), habiendo una diferencia de 0,4%.

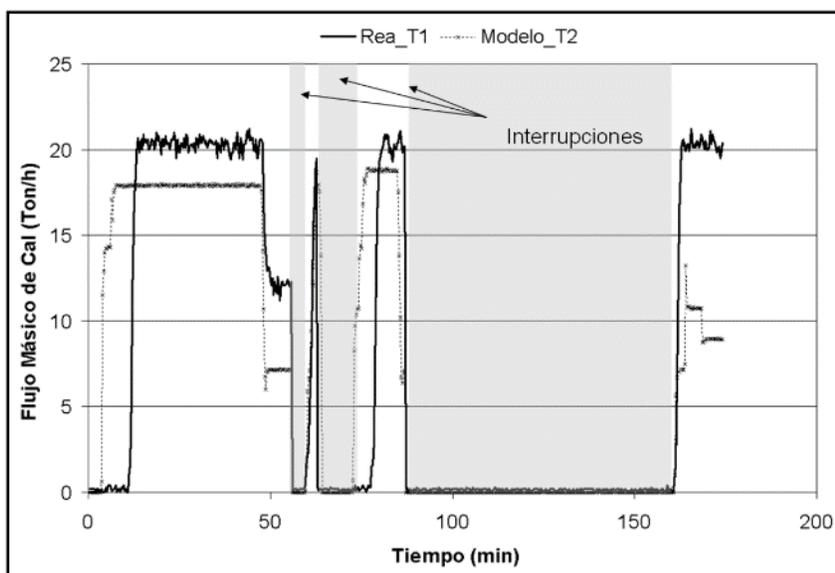


Fig. 4. Comparación entre los flujos estimados por el modelo, durante la etapa fusión del proceso de aceración primaria en HEA.

Evidentemente, al considerar un contenido de SiO_2 mayor que la química real de la colada en producción, el modelo predispondrá un mayor consumo de cal, obteniendo un índice de basicidad binaria de 2,26 y que con los flujos de HRD empleados por el fundidor del horno, se logró alcanzar una temperatura de 1532°C , al finalizar la etapa fusión. Bajo estas condiciones, según lo analizado se favorece la desfosforación del acero, el cual permitió conseguir una disolución del P en el acero de 0,007%; muy por debajo de la especificación (que para este acero es de 0,015%); pero con un alto consumo de cal por encima del requerido. Por tal motivo, se estima que al considerar el modelo de cal con la química real, con los mismos flujo de HRD empleados por el fundidor, se tendría un menor consumo de cal, al mismo tiempo que se tendría un mayor P disuelto en el acero, pero que dicha diferencia sería tal que aún se mantendría dentro de la especificación de calidad del producto.

C. Modelo de Simulación: Predisposición de Flujo de HRD

En la sección anterior se presentó el efecto que tiene el flujo de HRD en la temperatura del acero; ésta afecta las condiciones termodinámicas en la desfosforación del acero y por ende la calidad del mismo. Condición, que al no garantizarse una vez finalizada la etapa de fusión del proceso de aceración primaria en el horno eléctrico, en donde ya se ha fundido casi el 70% de la carga metálica, implicaría aumentar los tiempos de procesamiento del acero y con ello disminución de productividad. Por ello la importancia de contar un modelo que permita la predisposición del flujo de HRD lo más eficiente y óptimo posible.

Para ello, fue necesario determinar las variables de entradas que se miden en tiempo real y que tenga mayor efecto en el flujo de HRD. En este sentido, se encontró que la interacción del indicador ITHD con la energía específica tiene un efecto estadísticamente significativo con respecto a los flujos de HRD, tal y como se puede observar en la Fig. 5. En donde los mayores valores del indicador ITHD fuera de la estabilidad (mayores a 1,5%), son generados manteniendo un alto flujo de HRD y bajo consumo de energía específica aproximadamente 475 Kwh/ton. Efecto mejor conocido como “embaucamiento del horno”, el cual ocurre cuando se está suministrando un exceso de carga metálica (en este caso HRD) que con la energía aportada no es capaz de fundirlo por completo y más si el porcentaje de ganga contenido en este material tiende a ser alto, pues como indica [17], los elementos que conforman la ganga (especialmente SiO_2 y Al_2O_3) tienen alto punto de fusión. Causando una concentración significativa de toneladas de HRD en el centro del horno, justamente en las paredes adyacentes de los electrodos, reduciendo la formación de espuma, debido a un fenómeno de superficie que rompe las burbujas de monóxido de carbono. Dejando así, descubierto el arco eléctrico y en este sentido el incremento de los valores del indicador ITHD.

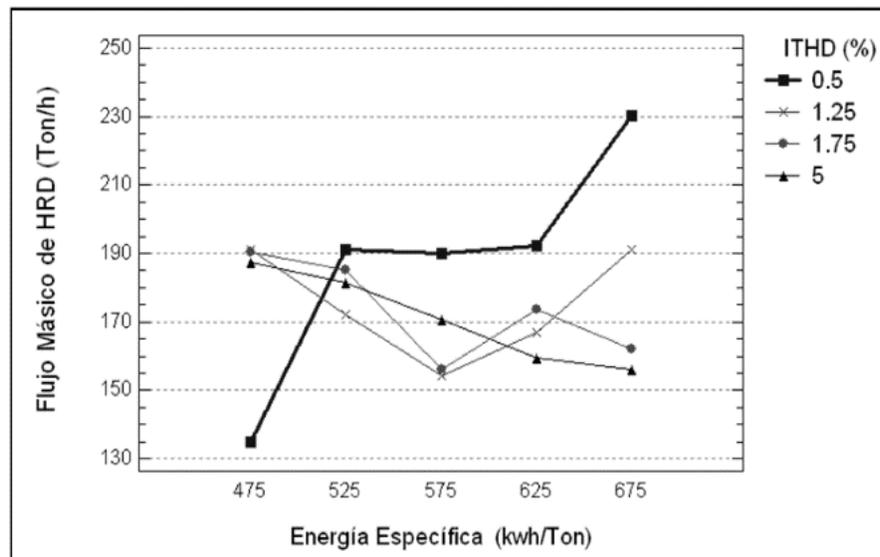


Fig. 5. Variabilidad del flujo de HRD con respecto a la energía específica y el indicador ITHD.

También se observó alto valores del indicador ITHD fuera de la estabilidad, a medida que se disminuye el flujo de HRD y se incrementa el consumo de energía específica. En este caso, debido a que se está suministro mayor energía al requerido para fundir la carga metálica, por lo que parte de esta energía es aprovechada y/o utilizada para

aumentar la temperatura del acero líquido. En donde, aumenta el oxígeno disuelto en el acero y simultáneamente aumenta el FeO en la escoria, y más aun manteniendo el consumo de carbón bajo, donde la cinética de reducción del óxido de hierro es desfavorecida. Se desfavorece así la formación de escoria espumosa teniendo a fluidizarla, originando que el volumen de la misma sea reducido (menores a 60 cm) y se incrementan las perturbaciones dentro del horno y más aún si se trabaja con arcos largos. En donde se tendría pocos beneficios metalúrgicos y un desgaste brusco del material refractario.

Sin embargo, este efecto tiende a ser significativo dependiendo del tiempo que se mantenga el horno bajo esas condiciones. Es por ello, que los fundidores de las diferentes cuadrillas que operan el horno eléctrico, frecuentemente proceden a disminuir el flujo de HRD (en un tiempo relativamente corto) minutos antes de finalizar la etapa fusión. De tal manera, que permita lograr una temperatura adecuada aun manteniendo la estabilidad de la escoria espumosa, en condiciones aceptable. Este comportamiento lo puede visualizar en la Fig. 5, siguiendo la línea correspondiente a los valores del indicador ITHD en el rango de 1,25%, hasta llegar a los bajos flujos de HRD (aproximadamente 150 Ton/h) con un consumo de energía específica de aproximadamente 575 Kwh/Ton.

En resumen, la mejor opción para manejar los flujos de HRD que garantice la temperatura ideal del acero, sin incrementar los valores del indicador ITHD fuera de la estabilidad y con ello una eficiente formación de escoria espumosa que permita la protección del material refractario durante el proceso de aceración primaria en el horno eléctrico, sería incrementar los flujos de HRD a medida que se incrementa el consumo de energía específica (cuya condición se reflejada en la Fig. 5, con la línea de mayor grosor correspondiente a los valores del ITHD igual a 0,5%), permitiendo que la corriente eléctrica se transfiera directamente al baño líquido para aprovechar el calor durante todo el ciclo del proceso, garantizando así el uso de posiciones más alta de control de potencia sin necesidad de aumentar la carga térmica (por radiación) en las paredes refractarias del horno.

Bajo este contexto, debido al efecto que tienen tanto el indicador ITHD como la energía específica en el flujo de HRD, ambos se consideraron como variables de entradas en el diseño del modelo. Otras de las variables de entradas que se tomaron en cuenta en este modelo, lo representa el flujo de las materias primas: cal, oxígeno y carbón. En un estudio anterior realizado por [18] se analizaron los efectos principales del flujo de las materias primas sobre el indicador ITHD. Donde se encontró que el consumo de cal tiende a aumentar los valores del indicador ITHD; mientras que el consumo de coque y el oxígeno tienden a disminuirlo. De modo, que estos flujos de las materias primas, si tienen un efecto en el indicador ITHD, y como este si evidenció tener un efecto estadísticamente significativo con respecto al flujo de HRD. Entonces, en el diseño del modelo matemático basado en la red neuronal artificial, para una predisposición más eficiente, también se consideró como variables de entradas las correspondientes al flujo de las materias primas.

D. Topología del Modelo de la Red Neuronal Artificial

El modelo de predisposición de flujo másico de HRD se llevó a cabo mediante una técnica de control inteligente; específicamente, la técnica de ANN, por tener mayor aplicación en el campo del modelado del comportamiento no lineal y variante en el tiempo del proceso de aceración primaria en hornos eléctricos. El patrón elemental para el entrenamiento de la red; con el propósito de predecir un flujo de HRD óptimo durante la etapa fusión del proceso aceración primaria, corresponde aquella colada de acero que logro en menor tiempo cumplir con las especificaciones requeridas y que son mantener valores en promedio del indicador ITHD menores a 1,5%; la carga total entre 210 y 250 Ton, temperatura del acero entre 1535 y 1570°C, energía específica menor a 540 Kwh/Ton y el porcentaje en masa del P disuelto menor a la especificación del acero (que varía según el tace).

El mejor entrenamiento y predisposición del modelo, se obtuvo empleando en el diseño de la red neuronal artificial, una topología del tipo NARX en conexión serie-paralelo, con 32 entradas, una capa oculta de 6 neuronas y considerando una función d activación del tipo lineal tanto en la capa oculta como en la capa de salida y con un delta de tiempo de 6 segundos.

Matemáticamente, el modelo basado en la red neuronal artificial, se puede expresar a través de la siguiente ecuación:

$$\dot{M}_{HRD} = \left(\sum_{n=1}^6 W_n^2 \cdot \left(\sum_{m=1}^{32} W_{nm}^1 \cdot X_m \right) + b_n^1 \right) + b^2 \quad (2)$$

Donde; M_{HRD} , flujo másico de HRD (ton/h); w_n^2 , pesos de la capa de salida; w_{nm}^1 , peso de la capa oculta; b_n^1 , tendencias de la capa oculta; b^2 , tendencia de la capa de salida y X_m , entradas de la red.

Los valores de pesos y tendencias tanto de la capa oculta como de la capa de salida, son coeficientes que como permiten el control y predisposición del horno eléctrico, por normativa de la empresa los mismos no pueden ser publicados en el presente documento. Sin embargo, a manera de apreciación, en la Fig.6, se muestra la correlación ($R^2=0.9$) existente entre el flujo de HRD real (patrón de entrenamiento) y el flujo de HRD estimado por el modelo una vez entrenado.

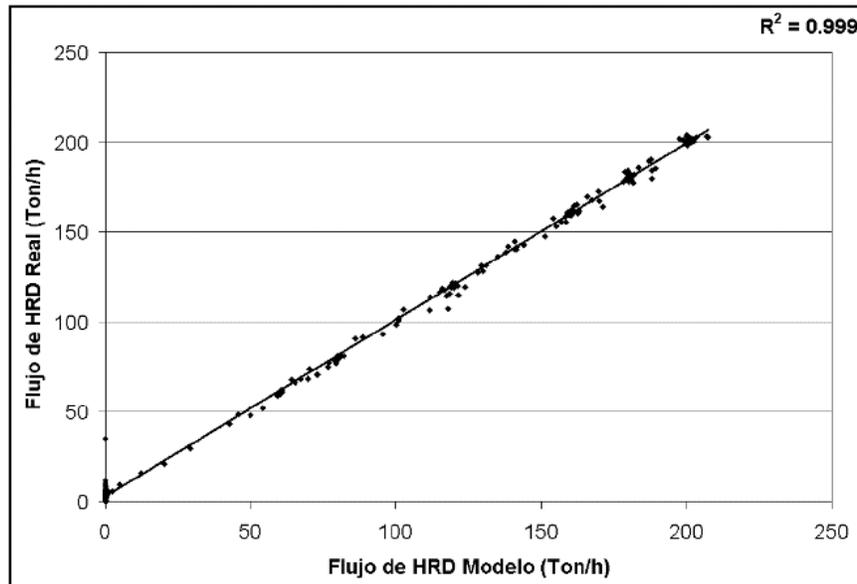


Fig. 6. Comparación entre el flujo de HRD real y el flujo de HRD predicho por el modelo matemático de la red neuronal.

E.Pruebas Fuera de Línea del Modelo Matemático de Validación y Ajuste

Se hicieron pruebas con coladas de acero, donde se empleó un patrón de flujo de HRD con un nivel de eficiencia bueno durante la etapa fusión del proceso de aceración primaria, el cual permitió cumplir en gran medida con las especificaciones de la colada al finalizar la etapa (ver tabla 1).

Tabla 1. Resultados de emplear un patrón del flujo de HRD con un nivel de eficiencia bueno durante la etapa fusión durante el proceso de aceración primaria en el horno eléctrico.

P en acero (%)	C en el acero (%)	ITHD (%)	Carga Total (Ton)	Energía Especifica (Kwh/Ton)	Temperatura (°C)
0.007	0.073	1.63	216.84	560.60	1557

Considerando los patrones de entradas empleados en dicha colada, se predice el flujo de HRD ideal a través del modelo propuesto, este comportamiento se puede visualizar en la Fig. 7.a. Como se puede notar, el flujo de HRD predicho por el modelo tiene una tendencia a estar relativamente por encima del flujo real, según la energía suministrada al horno. Se estima que una de las causas que favorece dicho comportamiento, se debe a una disminución de la temperatura del baño metálico con el incremento del caudal de HRD, para beneficiar la estabilidad de la escoria espumosa. Debido a que, mientras mayor sea la temperatura, tiende a que la escoria sea muy fluida, originando que el espesor de la misma disminuya, por lo que las perturbaciones dentro del horno serían presenciadas y más

aún si se trabaja con arcos largos, como se trabaja en la etapa de fusión.

Otra causa, lo representa el aumento del contenido de FeO en la escoria, pues a medida que se incrementa el flujo de HRD, se incrementa el contenido de FeO en la escoria, generado con la inyección de oxígeno y al reaccionar con el hierro disuelto en el acero líquido, para luego ser reducido con el carbono, produciendo CO y de esta forma dar ciclo al proceso de formación de escoria espumosa; aportando energía química que ayuda a la fusión acelerada del HRD. Ante este argumento se justifica el incremento del flujo de HRD estimado por el modelo en este tipo de coladas, ya que garantiza mantener valores de ITHD estables durante el proceso de aceración en la etapa fusión, además de cumplir con el resto de las variables operativas finales del proceso e incluso en menor tiempo de procesamiento, tal y como se puede apreciar en la Fig. 7.b. En donde, se nota claramente que para llegar al mismo peso de HRD obtenido con el flujo de HRD real, que en este caso es 166,84 Ton; el modelo logra llegar al mismo tonelaje de HRD, pero un tiempo (65,62 min) significativamente menor en comparación con el tiempo que se obtiene empleado el flujo real que fue 71,87 min. Lográndose con ello una disminución del tiempo de procesamiento del acero en un orden del 8%.

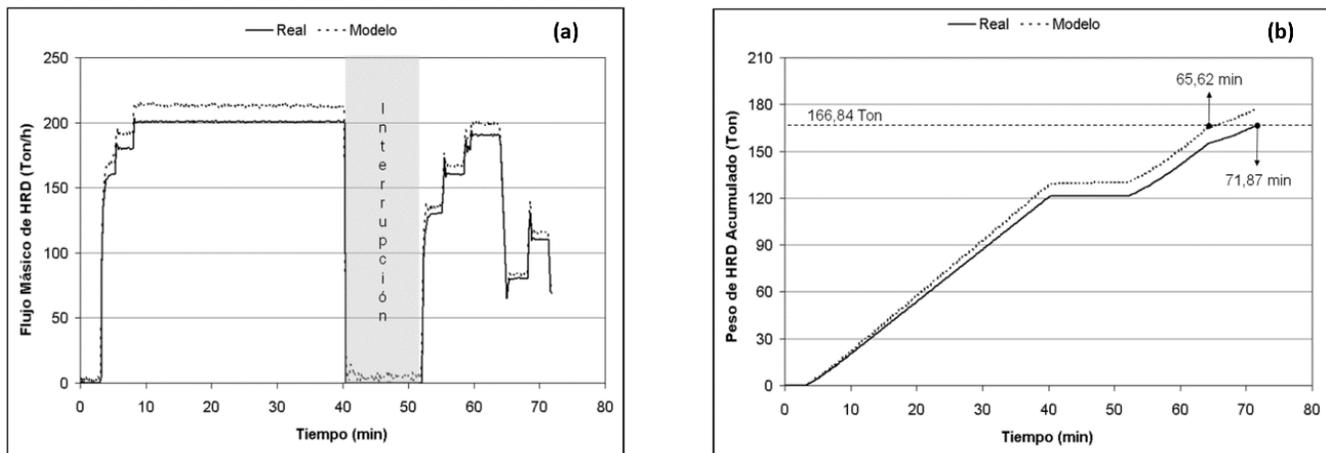


Fig. 7. Comparación del dato real con el dato estimado por modelo: (a) considerando el flujo de HRD y (b) considerando el peso de HRD

Por otra parte, es muy importante destacar que el consumo de cal obtenido con el modelo fue de 20,94 Ton; siendo este valor menor en comparación con el consumo de cal obtenido con flujo real empleado por el fundidor durante la etapa de fusión del proceso de aceración primaria; que fue de 22,70 Ton. Este último, generó que el índice de la basicidad binaria de la escoria fuera un poco alto (2,5); cuyo valor a una temperatura del acero adecuada de 1557°C (obtenido gracias al patrón eficiente del HRD empleado en esta colada), permitió obtener una condición termodinámica eficiente para que ocurra la desfosforación del acero. Donde el P disuelto del acero (ver tabla 1) estuvo muy por debajo de la especificación del producto que es 0,015%. De modo que a través del modelo de predisposición del flujo de cal mezcla, en combinación con el modelo de predisposición del flujo de HRD, se estima un consumo mucho más eficiente e incluso menor (en un orden del 5.28%) al obtenido con la predisposición empírica del fundidor, en donde quizás se hubiese aumentado un poco el contenido del P disuelto en el acero, pero aún valor tal que aún se mantendría dentro de la especificación del producto final.

A. Impacto sobre la Producción de Acero a partir del Modelo Matemático Propuesto

En la sección anterior se obtuvo por medio del modelo matemático desarrollado, el dato referente al ahorro estimado que se tendría en cuanto al tap to tap (tiempo de fabricación de acero) y el consumo de cal mezcla promedio por colada. Al considerar el impacto que tiene en la fabricación de acero anualmente, el resultado es verdadera muy significativo, tal y como se detalla en la tabla 2. En dicha tabla, se especifica el impacto que tiene el modelo sobre la productividad del proceso. En donde, evidentemente al disminuir el tap to tap en un promedio de 8,89 min por colada (estimado por el modelo), se logra aumentar la productividad del horno, pasando de 94,29 a 101,37 ton/h.

En el mismo orden de ideas, considerando el hecho de que el operador logró fabricar 2647 coladas con un tiempo promedio de 127.7 minutos, el modelo pudo haber mejorado el tiempo de fabricación a un promedio de 118.38

minutos por colada, por lo que hubiese fabricado adicionalmente 199 coladas para llegar a un total de 2845 coladas. Así pues, asumiendo que cada colada tiene un peso de 200 ton, a través de modelo se logra aumentar las toneladas de acero líquido producido con una diferencia de 39744,45 toneladas; adicionales al utilizado por el fundidor.

Tabla 2. Comparación de producción de acero líquido acumulado desde enero 2014 - diciembre 2015.

Indicadores	Unidades	Valor Real	Valor Estimado	Desviación
Tap to Tap	(min)	127.7	118.38	-8.89
Productividad	(Ton/h)	94.29	101.37	7.08
Nro. Coladas Fabricadas	----	2647	2845	199
Acero Producido	(Ton)	529302	569046.45	39744.45

IV.CONCLUSIONES

1.La aplicación de la técnica de control inteligente basado en ANN, permite modelar el comportamiento no lineal del proceso de aceración primaria en horno eléctrico, en este caso, ideal para la predisposición del flujo de HRD.

2.El modelo matemático propuesto, permite predisponer un flujo de HRD y cal mezcla durante la etapa fusión del proceso de aceración primaria en el horno eléctrico, que asegura la condición termodinámica ideal para la protección del material refractario y desfosforación del acero.

3.La formación de una escoria balanceada (espumosa) ideal para una desfosforación efectiva y protección del material refractario durante la etapa fusión del proceso de aceración primaria en el horno eléctrico, se logra bajo una condición termodinámica ideal: una temperatura en el rango de 1535 a 1575 °C, el indicador ITHD menores a 1,5% y un índice de basicidad binaria comprendido entre 2 y 2,6.

4.El sistema integral del modelo matemático propuesto basado en un control inteligente de proceso dinámico, estima una reducción del Tap To Tap en torno al 7,08%, una reducción del consumo de cal en 5,28% y un aumento de la productividad en torno al 7,51%.

REFERENCIAS

- [1]Asociación Latinoamericana del Acero, "Alacero", [En línea]. Available: https://www.alacero.org/sites/default/files/publicacion/proceso_siderurgico.pdf. [Último acceso: 04 Julio 2020].
- [2]F. Morral, E. Jimeno y P. Molera, Metalurgia general, Barcelona: Reverté, 1985.
- [3]B. Bucciarelli, G. Torga, F. Sabugal, F. Díaz y M. Lardizabal, "Evolución en el control del fósforo en la acería de Ternaris SIDERCA", de 18a Conferencia de acería del IAS, Rosario, Santa Fe, 2011.
- [4]S. Kalpakjian y S. Schmid, Manufactura, ingeniería y tecnología, 4ta ed., México: Pearson educación, 2002.
- [5]M. Oropeza, J. López, A. Pérez y J. Ucar, "Contribuciones para el control del fósforo cuando se utiliza mineral reducido de hierro", Revista metalurgia, vol. 35, n° 2, pp. 479-490, 2008.
- [6]J. Castro y F. Echeverría, Introducción a las técnicas de computación inteligente, 1era ed., Venezuela: Universidad de los andes, 2001.
- [7]A. Sadeghian y J. Lavers, "Application of radial basis function networks to model electric arc furnaces", IJCNN, vol. 6, pp. 3996-4001, 1999.
- [8]J. Brito, "Diseño de un control automatizado para la alimentación de cal mezcla en función del HRD para ajustar la basicidad binaria de la escoria del horno eléctrico #1 de la acería de planchones de Ternium SIDOR", trabajo de grado inédito, 2008.
- [9]A. Zambrano, V. Collazo, N. Troncone y J. Rodríguez, "A computer tool for closed-loop dynamical system identification through artificial neural networks", Universidad, Ciencia y Tecnología (UCT), vol. 16, n° 64, pp. 190-202, 2012.

- [10]E. Moreno, Tecnología de producción del ferrosilicio, 3era ed., Venezuela: Ferroatlántica de Venezuela, 2005.
- [11]C. García, "Optimización del proceso de formación de escoria espumosa en los hornos eléctricos de acerías de planchones de Sidor", trabajo de grado inédito, UNEFM, Punto Fijo, 2011.
- [12]M. Rojas, "Estudio del consumo de cal, coque, oxígeno y HRD en el proceso de formación de esocria epsumosa en el HE-5 de la acería de planchones de Sidor, C.A.", trabajo de grado inédito, UNEXPO, Puerto Ordaz, 2012.
- [13]R. Morales, R. Lule, F. López, J. Camacho y J. Romaero, "The slag foaming practice in EAF and its influence on the stelmaking shop productivity", ISIJ International, vol. 35, n° 9, pp. 1054-1062, 1995.
- [14]W. García, "Implementación de prácticas de escorias espumosa en los EAF de la acería eléctrica de planchones de Sidor, C.A.", trabajo de grado inédito, USB, Caracas, 2002.
- [15]S. Alameddine, B. Bowman, S. Paege y P. Stafford, "Innovation in EAF and in steelmaking processes", de AIM, Milano-Italia, 2009.
- [16]J. Mateos, "Análisis y optimización de costes en una planta de procesado y producción de acero", trabajo de grado inédito, UC3M, Madrid, 2010.
- [17]A. Conejo y J. Cárdenas, "Energy consumption in the EAF with 100% DRI", AISTECH Proceeddings, vol. 1, pp. 529-535, 2006.
- [18]M. Rojas, O. Prado, O. Carvajal y R. Higuerey, "Impacto del consumo de cal, coque, oxígeno y HRD en la formación de escoria espumosa durante el proceso de aceración primaria en hornos de arco eléctrico", Universidad, Ciencia y Tecnología (UCT), vol. 17, n° 67, pp. 134-140, 2013.

RESUMEN CURRICULAR



Marlon Rojas, Magister Scientiarum en Ingeniería Metalúrgica, venezolano. Destacado profesional con 9 años de experiencia en el área de automatización desarrollando modelos matemáticos basados en inteligencia artificial aplicados a la mejora continua de los procesos de producción siderúrgicos.



Olga Prado Leivas, Graduada en Matemáticas Industriales en la UCV, venezolana. Su vida profesional se desarrolla tanto en la industria como en la docencia. En la industria siderúrgica desde hace más de 30 años, dirige proyectos para el desarrollo e implementación de modelos matemáticos para la operación de grandes máquinas. En la docencia ha trabajado en varias facultades de ingeniería impartiendo cursos de análisis, métodos numéricos y diseño experimental tanto a nivel de pregrado como de postgrado. El punto de unión de estos dos mundos lo logra a través de sus tesis, dirigiendo sus proyectos de tesis, logrando ellos en muchos casos, los más altos reconocimientos por sus proyectos.



Octavio Carvajal, Ingeniero químico con diploma en siderurgia del instituto argentino de siderurgias (IAS), venezolano. Tiene 23 años de experiencia en instalaciones siderúrgicas con tecnologías EAF-LF-CC.



Alejandro Zambrano, Ingeniero electrónico, venezolano. Posee 10 años de experiencia en el diseño, desarrollo e implementación de modelos de control de procesos para industria siderúrgica.


$$H(t) |\psi(t)\rangle = i\hbar \frac{d}{dt} |\psi(t)\rangle$$