

Generación de regímenes óptimos de operación de hornos metódicos de calentamiento

Generation of optimal operation regimes of methodical reheating furnaces

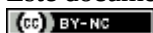
Luís Suárez García¹, José Arzola Ruiz^{2,*}

¹Unidad Docente Metalúrgica. Facultad de Ingeniería Mecánica. Universidad Tecnológica de la Habana. “José Antonio Echeverría”, CUJAE. Calle 114, # 11901, e/Ciclovía y Rotonda, Marianao. La Habana, Cuba.

²Centro de Estudios de Matemáticas, Instituto de Ciencias Básicas. Universidad Tecnológica de la Habana. “José Antonio Echeverría”, CUJAE.

*Autor de correspondencia: jarzolacm@icb.cujae.edu.cu

Este documento posee una [licencia Creative Commons Reconocimiento/No Comercial 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)



Recibido: 1 mayo 2021 **Aceptado:** 13 mayo 2021 **Publicado:** 1 de junio 2021

Resumen

En el presente trabajo se estudia el estado del problema de la optimización automatizada en tiempo real del consumo energético del proceso de calentamiento en hornos metódicos de calentamiento de palanquillas en la industria siderúrgica. Se presentan los fundamentos teóricos de la generación de tecnologías óptimas de calentamiento en hornos metódicos utilizando, como parte del modelo matemático descriptor del proceso, así como un conjunto de funciones de aproximación a funciones dadas como tablas, gráficos o nomogramas. El procesamiento de cada solución del algoritmo de cálculo incluye cálculo del calentamiento del acero y del balance térmico correspondiente a esa solución. En calidad de algoritmo de optimización se utiliza una variante del Método de Exploración en una Red de Variables. Se restringen la temperatura final del calentamiento a la salida del horno y la diferencia de temperaturas entre superficie y centro y se penaliza la función objetivo por el incumplimiento de las restricciones. Como resultado se obtienen reglas de conducta apropiadas para la optimización automatizada en tiempo real del proceso.

Palabras clave: Hornos metódicos, sistemas de ingeniería, toma de decisiones, automatización del calentamiento de palanquillas, ahorro de energía

Abstract

In the present work, the state of the art of the problem of the automate optimization, in real time, of energy consumption of the billets reheating process in steel making industry, theoretical basis of the generation of optimal heating of the steel in methodical furnaces technologies are presented. As a part of the mathematical model for describing the process, a group of approximation models to the corresponding functions given by charts, graphics or monograms are used. The prosecution of each solution of the optimization algorithm includes the calculations of the heating of the steel process and of the thermal balance corresponding to every solution. In quality of optimization algorithm a variant of the Exploration in a Net of Variables Method is used. The final temperature of the heating at the exit of the furnace and the difference of temperatures between the surface and center of the metal are restricted and the objective function is penalized for the nonfulfillment of the restrictions. As an appropriate result for the automate optimization in real time of the process behavior, rules are obtained.

Keywords: Methodical furnaces, engineering systems, decision making, automation of billets reheating, energy saving

1. Introducción

El calentamiento del acero antes de su laminación constituye un componente importante del consumo energético total de los talleres de laminación [1,2]. El estado térmico del metal calentado a la salida de los hornos determina los costos de las subsiguientes etapas, principalmente por concepto de los gastos energéticos en los motores principales de los castillos de laminación [3]. Al desarrollar un sistema automatizado para la operación óptima del calentamiento de palanquillas hay que tener presente que en los hornos metódicos de calentamiento tienen lugar simultáneamente varios procesos de alta temperatura estrechamente relacionados [1-3], los que determinan finalmente la temperatura final de las palanquillas a la salida del horno [3-5]. La interacción de los parámetros individuales de los hornos de calentamiento de los sistemas de control conduce a procesos de muy alta complejidad durante la aplicación de procedimientos para la optimización del consumo energético durante el calentamiento de las palanquillas [4-6].

En la implementación práctica de la operación óptima automatizada para el ahorro de energía en los hornos industriales, los sistemas de control interrelacionados son: los lazos de control de temperatura (conductor) [7], la temperatura del medio de calentamiento (la llama), la temperatura característica de cada zona, la temperatura de la superficie del refractario, temperatura de la superficie del metal a la salida del horno, la presión bajo bóveda y los sistemas de control de relación aire-combustible, combustible-atomizador (aire comprimido o vapor). En condiciones de optimización del consumo energético del horno, estos sistemas se encuentran subordinados al sistema de operación automatizada del horno, el que a su vez se subordina al sistema automatizado de operación del taller de laminación [3, 8, 9]. La operación óptima del proceso requiere sin dudas del desarrollo de sistemas automatizados que permitan hallar el régimen de calentamiento óptimo. En adelante, se brindan las herramientas desarrolladas por los autores con el fin de elaborar reglas de conducta que facilitan la implementación de sistemas de operación para la minimización automatizada del consumo de energía durante el calentamiento de palanquillas, lo que constituye el objetivo del presente trabajo.

2. Materiales y Métodos

En el análisis de las metodologías de cálculo para el calentamiento del metal en hornos metódicos se utiliza una serie de coeficientes y parámetros que hasta la actualidad se hallan con ayuda de gráficos, tablas y nomogramas [10], cuya aplicación en la realización de los cálculos requeriría de la introducción de los datos correspondientes en bases de datos y del uso recurrente de las técnicas de interpolación, lo que presupone la introducción de errores y lentitud de procesamiento. Esta circunstancia introduce dificultades serias para su implementación de la solución de los diferentes problemas de transferencia de calor y de fluidos, por medios computarizados, siendo necesario buscar funciones de aproximación en la realización de los cálculos térmicos, de transferencia de calor y masa así como del balance térmico del horno.

En adelante, se presentan las ecuaciones para la búsqueda de los grados de negrura del dióxido de carbono y el agua que son los más característicos en los hornos metalúrgicos, el coeficiente de conductividad térmica del acero al carbono, el coeficiente de difusividad de la temperatura, así como el número característico en la ecuación diferencial de la conducción del calor de una lámina infinita, permitiendo la elaboración de software para el cálculo del calentamiento del metal y balance térmico de los hornos, ya que el proceso de calentamiento se simula como el de un corte transversal de una palanquilla desde la entrada a la salida del agregado, estableciéndose un estado estacionario

correspondiente al proceso no estacionario de esa lámina [3]. A partir de la información discretizada de los nomogramas para el cálculo de los grados de negruras del CO₂, CO, SO₂ y H₂O, fueron elaboradas las funciones de aproximación siguientes:

Grado de negrura del CO₂

$$\begin{aligned} \varepsilon_{CO_2} = & 0,0272899 + 0,00901749 \ln(PCO_2 * Se) + 0,00991982 (PCO_2 * Se) \\ & - 0,00318202 (PCO_2 * Se) \ln(PCO_2 * Se) + 0,000613643 (PCO_2 * Se)^{1,471725} \\ & + 0,000282287 Tg - 0,00014052 Tg^{1,975808} \end{aligned} \quad (1)$$

Donde:

PCO₂ - Presión parcial del dióxido de carbono (Pa).

Se - Longitud efectiva del rayo (m).

Tg - Temperatura de los gases (°C).

El error de aproximación de esta ecuación es de 1,5% para un intervalo de confianza del 95%.

Grado de negrura del agua

$$\begin{aligned} \varepsilon_{H_2O} = & 0,0286198 + 0,000551774 (PH_2O * Se)^{1,3624} - 0,0153523 PH_2O Se \ln(PH_2O * Se) \\ & + 0,0537186 (PH_2O * Se) - 0,000000958666 (PH_2O * Se)^{1,83624} PH_2O Se \\ & + 0,000318976 Tg - 0,000336665 Tg^{0,74306} \ln(Tg) - 0,0000253212 Tg \ln(PH_2O * Se) \end{aligned} \quad (2)$$

Donde: PH₂O Presión parcial del agua (Pa)

Se - Longitud efectiva del rayo (m).

Tg - Temperatura de los gases (°C).

El error de aproximación de esta ecuación es de 1,6% para un intervalo de confianza del 95%.

Coefficiente adimensional β

$$\begin{aligned} \beta = & 1,0457 + 0,0636624 PH_2O + 205,27 PH_2O^{0,462187} - 205,335 PH_2O^{0,0462187} (PH_2O * Se)^{0,12} \\ & - 0,047068 PH_2O^{1,462187} + 0,121001 \ln(PH_2O) \ln(PH_2O * Se) + 1,32483 \ln(PH_2O * Se) + \\ & 1,17259 \ln(PH_2O * Se) * (PH_2O * Se)^{0,0121431} + 0,0000416818 * (PH_2O * Se) * \ln(PH_2O) \end{aligned} \quad (3)$$

Donde: PH₂O - Presión parcial del agua (Pa).

Se - Longitud efectiva del rayo (m).

El error de aproximación de esta ecuación es de 1,4% para un intervalo de confianza del 95%.

Coefficiente de conductividad térmica

El coeficiente de conductividad térmica es una función dependiente de la composición química del metal y su temperatura. La información que se brinda en la literatura especializada presenta el coeficiente para una composición química dada para las diferentes marcas de acero, separándolas por el contenido de carbono en bajo, medio y alto carbono, las que se utilizan como patrón en el cálculo del calentamiento del metal sin tener posibilidad de ajustar el coeficiente para el caso específico de composición del metal que se esté calculando. A partir de la información tabulada del coeficiente de conductividad térmica por temperaturas y composición química, se elaboró una dependencia para los aceros al carbono, que se expresa en la Ecuación (4).

Coeficiente de difusividad térmica

El coeficiente de difusividad térmica caracteriza la intensidad del intercambio de calor molecular [10], este depende de la conductividad térmica del material, la capacidad calórica y la densidad; al igual que el coeficiente de conductividad térmica, está tabulado para diferentes aceros según su temperatura, con una composición química determinada, presentando dificultades para el cálculo automatizado de los hornos y su balance térmico. Utilizando las técnicas anteriormente expuestas, se elaboró a partir de las tablas, la dependencia para el acero al carbono mostrada en la Ecuación (5).

$$\lambda = \left\{ \begin{array}{l} -890,37 + 0,589T + 865,4155C + 0,341 \times 10^{-4} T^2 \\ -595,6605C^2 + 173,3290C^3 - 200,1011 \ln\left(\frac{C}{12,0112}\right) \\ -0,2595CT + 0,0176C^3T + 0,1451T \ln\left(\frac{C}{12,0112}\right) \\ -3,3643 \times 10^{-4} T^2 + 7,154C^3 + 2,753C^2T^2 - 6,7662 \times 10^{-8} C^3T^3 \\ -3,489 \times 10^{-9} \ln\left(\frac{C}{12,0112}\right) \end{array} \right\} \quad (4)$$

Donde: T - Temperatura media del metal en ($^{\circ}\text{C}$).

C - Concentración de carbono (%).

El error de aproximación de esta ecuación es de $1,44 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$ para un intervalo de confianza del 95%.

$$a = \frac{\left[5,8599 - 0,0075T + 4,10642 \times 10^{-10} T^2 + 0,0533C \ln\left(\frac{T}{100}\right) - 0,089 \ln\left(\frac{T}{100}\right) \right]}{360000} \left(\frac{\text{m}^2}{\text{h}} \right) \quad (5)$$

Donde: T - temperatura media del metal ($^{\circ}\text{C}$).

C - Concentración de carbono en el metal (%).

Número característico

En la conducción del calor de una lámina infinita en régimen no estacionario con condiciones de frontera de tercera especie y temperatura constante del medio, se utiliza el número característico μ . Tomando como base la ecuación de referencia y con la utilización de métodos numéricos se generó una serie de datos, para obtener la ecuación para la primera raíz de la Ecuación (6), donde Bi es el criterio de Biot.

$$\mu = -62,3975Bi + 0,0041Bi^2 - 7,6344Bi^{0,2} + 214,808Bi^{0,4} + 413,791Bi^{0,7} - 572,208Bi^{0,8} + 310,877Bi^{0,9} - 296,379Bi^{0,5} - 0,00010573Bi^{2,5} \quad (6)$$

Esta dependencia permite utilizar la solución analítica para determinar el criterio adimensional de la temperatura obviando los nomogramas. Se establece una primera aproximación μ^{est} y su valor final se halla por un algoritmo de búsqueda iterativa de raíces de procedimientos implícitos de cálculo. Modelos semejantes se utilizan para el cálculo de la segunda y tercera raíces, las que también se utilizan en el cálculo de distribución de temperaturas en la palanquilla durante su calentamiento. A

partir de la metodología propuesta en [10] y utilizando las expresiones (1)-(6), se elabora el algoritmo para el cálculo de las temperaturas del metal a la salida de los hornos metódicos presentada en la Figura 1. Este algoritmo está diseñado para el cálculo de la temperatura de la superficie y el centro del metal en cada zona y se aplica para hornos con un número arbitrario (n) de zonas.

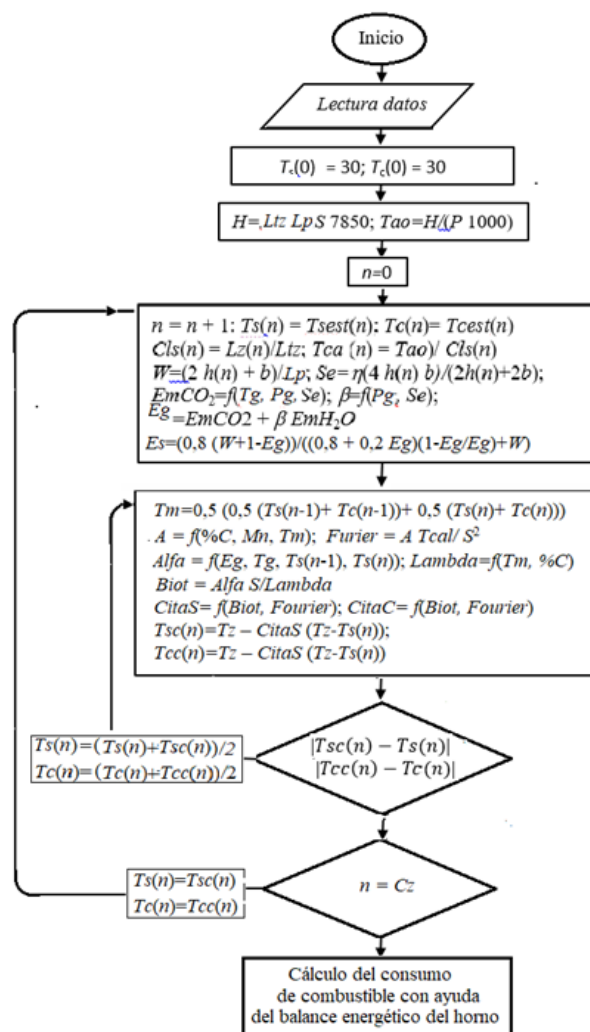


Fig.1 Algoritmo de cálculo del calentamiento del metal por zonas

En la Figura 1 se utiliza la simbología siguiente:

Cz : Cantidad de zonas

H : Intensidad activa del piso

Lz : longitud del horno

Lp : longitud de la palanquilla

TAO : tiempo de permanencia del metal en el horno

$Clz(x)$: Parte de la longitud del horno ocupada por la zona x

$Tcal(x)$: tiempo de calentamiento en la zona x

$Ts(x)$: temperatura de la superficie de la palanquilla a la salida de la zona x

$Tc(x)$: temperatura del centro de la palanquilla a la salida de la zona x

W : Grado de desarrollo de la mampostería (fracción de radiación que aportan las paredes al metal)

Se : espesor efectivo de la capa de gases

$EmCO_2$: emisividad del CO_2

EmH_2O : emisividad del H_2O

Em : emisividad efectiva de los gases

E_s : espesor efectivo de la capa de gases

B : porción efectiva de la emisividad del agua

S : sección transversal de la palanquilla

x : Contador de zonas

$CitaS$: temperatura adimensional de la superficie

$CitaC$: temperatura adimensional del centro

$T_s(x)$ y $T_c(x)$: Temperaturas en la superficie y centro por zonas respectivamente

T_m : Temperatura media del metal

A : Coeficiente de difusividad térmica

$Alfa$: coeficiente de intercambio convectivo del medio con el metal

$T_{sc}(x)$ y $T_{cc}(x)$: Temperaturas en la superficie y centro calculadas por zonas respectivamente

$D_{sc}(x)$: Diferencia superficie centro en el metal por zona

3. Resultados y Discusión

Optimización del Consumo energético

Se requieren determinar las temperaturas del espacio de trabajo de las zonas de calentamiento y de saturación de un horno metódico de calentamiento, asegurando el consumo energético mínimo por tonelada de acero producida y el cumplimiento de una serie de restricciones.

En calidad de restricciones fundamentales se introducen el aseguramiento de la temperatura real de la superficie del metal mayor o igual a un valor preestablecido y de una diferencia de temperatura entre la superficie y el centro inferior a un valor preestablecido. Es decir, se requiere hallar valores tales de las temperaturas de las zonas del horno $T(i)$ que:

$$\text{Minimizar } EH = EH(T_i), \quad (7)$$

Asegurando el cumplimiento de las restricciones:

$$T_{sup} \geq T_{sup}^{min} \quad (8)$$

$$\Delta T_{s,c} \leq \Delta T_{s,c}^{max} \quad (9)$$

Donde:

$E_H(T_i)$: Energía calculada consumida en calentar una tonelada de acero. Se adopta como tal el caudal de combustible obtenido como resultado del balance energético, según se ilustra en la Figura 1, para una composición química del acero y una productividad del horno dadas, dependiente de las temperaturas de las zonas T_i , en cada iteración del algoritmo de optimización.

T_{sup} : Temperatura calculada de la superficie del acero a la salida del horno

T_{sup}^{min} : Valor mínimo establecido, como dato de entrada, para la temperatura de la superficie del acero a la salida del horno

$\Delta T_{s,c}^{max}$: Valor máximo establecido, como dato de entrada, para la diferencia de temperatura entre la superficie y el centro

$\Delta T_{s,c}$: Diferencia de temperatura calculada entre la superficie y el centro del acero a la salida del horno

Es posible la introducción de complejidades mayores a las presentadas en el modelo anterior, lo cual se reflejaría en esta tarea mediante la adición de componentes en la función objetivo y la

introducción de nuevas restricciones. Sin embargo, estas complejidades no varían el carácter del modelo expuesto, por lo que no es necesario profundizar en el tema. El cálculo de E_H , T_{sup} y $\Delta T_{s,c}$: incluye la simulación del proceso de calentamiento del metal dentro del horno en correspondencia con lo expuesto, así como la realización del balance térmico del horno; es decir, los indicadores de eficiencia del proceso se obtienen como resultado del procedimiento de cálculo estudiado anteriormente.

Método de optimización empleado

Fueron investigados numerosos métodos exactos y heurísticos para la búsqueda de solución a la tarea formulada, procurando en todos los casos obtener resultados correctos en un tiempo razonable, por lo que finalmente fue seleccionado el método de Exploración en una Red de Variables, asegurando el cumplimiento de las restricciones con ayuda de la función de penalización de J. N. Kelley. El método de optimización y la función de penalización señalados, se exponen adecuadamente en la Figura 2, para el caso concreto de un horno con 1 zona de calentamiento y 1 de saturación. Para los casos de 3 y 4 zonas se implementaron algoritmos semejantes.

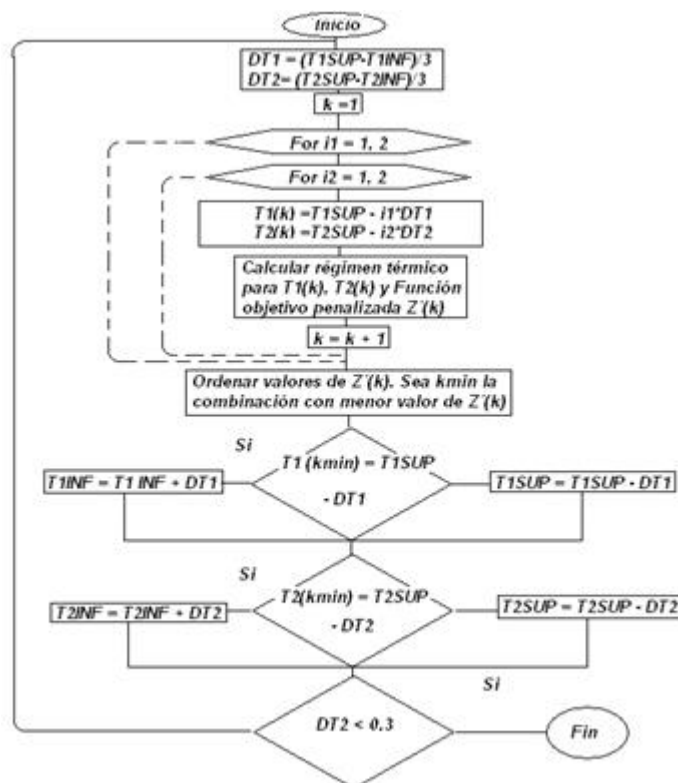


Fig.2 Algoritmo de optimización desarrollado

Designación de variables utilizadas

T_{1SUP} y T_{1INF} : son valores lógicos superior e inferior de T_1 , igual para T_2

$Z'(k)$ = Energía consumida en calentar una tonelada de acero + Función de Penalización

Penalización = Componente por violación de restricción de temperatura de superficie + componente por violación de restricción de diferencia entre superficie y centro

Validación del procedimiento de cálculo utilizado propuesto

El software en su primera instancia fue validado con los cálculos de los proyectos de grado de los estudiantes de cuarto año de la carrera, así como se han realizado disímiles cálculos de espesores de

paredes y diferentes revestimientos refractarios, con el objetivo de conocer las pérdidas de calor a través de estas. Como aplicación tecnológica, los resultados del cálculo se validaron en el Taller 300 de la Empresa Siderúrgica José Martí (Ver Tabla 1), donde se tomó el resultado de una jornada laboral normal del taller estando el horno con un ritmo de trabajo estable, siendo los parámetros de explotación los siguientes:

Tabla 1. Comparación de los parámetros de cálculo con los de explotación

	Parámetros de explotación	Parámetros calculados
Temperaturas de las zonas, °C:		
Metódica.	1150	1142
Calentamiento	1210	1212
Saturado	1180	1115
Humos	900	900
Productividad (t/h):	25	
Temperaturas del metal al final del calentamiento, °C:		
Superficie	No se mide	1092
Centro	No se mide	1049,5
Diferencia entre superficie y centro	No se mide	42,5
Consumos por zonas: Metódica		
Aire (m³/h)	6000	no se calcula
Fuel Oil	300	
Calentamiento		
Aire (m³/h)	3500	No se calcula
Fuel Oil	300	
Saturado		
Aire (m³/h)	9000	No se calcula
Fuel Oil	750	
Consumo total del horno, Kg/h	1129	986
Índice de consumo de combustible, Kg/t	45,16	39,44
Composición química del Metal, %.		
Carbono	0,3	
Manganeso	0,55	
Silicio	0,15	
Fosforo	0,039	
Azufre	0,039	

Nota: El termino centro se entiende por la cara más fría del metal

Elaboración de reglas de conducta

Un procedimiento económico y efectivo de automatización de la operación de los procesos productivos consiste en la elaboración de reglas de conducción a partir de la explotación de sistemas de generación de tecnologías óptimas [3]. El sistema desarrollado sobre la base de la investigación descrita en el presente trabajo se utiliza a continuación para la elaboración de estas reglas en el ejemplo del horno metódico de calentamiento tomado como caso de estudio, para lo cual se varía la productividad del horno con un intervalo de 1 t/h. En la Tabla 2 se muestran los resultados obtenidos en la elaboración de estas reglas para cada una de las zonas del horno.

Tabla 2. Experimentación para la elaboración de las reglas de conducta del proceso (marca de acero SAE 1035)

Productividad	Temperatura zona 2	Temperatura zona 1
20	1050	1100
21	1055	1105
22	1060	1110
23	1065	1120
24	1070	1130
25	1078	1140
26	1083	1150
27	1090	1160
28	1100	1180
29	1115	1190
30	1120	1200
31	1130	1215

Regla de Conducta elaborada para la zona de calentamiento $Tzs = 1128,87 - 9,48 Prod + 0,4 Prod^2$

R-cuadrado (ajustado a los grados de libertad) = 99,471%

Error estándar de la estimación = 1,94011

Regla de Conducta elaborada para la zona de calentamiento $Tzc = 1116,73 - 10,14 Prod + 0,34 Prod^2$

R-cuadrado (ajustado a los grados de libertad) = 99,6016%

Error estándar de la estimación = 2,47027

Como puede observarse el error de apreciación de la temperatura de cada una de las zonas no supera los 5°C, para una probabilidad de confianza del 95%. Una vez elaboradas las reglas de conducta para todas y cada una de las marcas de acero, se hace posible su implementación en el PLC de control del horno, quedando disponible, para el mando automatizado del mismo, el que se encarga de gobernar los restantes sistemas de control a partir de la temperatura establecida para cada zona.

4. Conclusiones

El estudio del estado del arte realizado del problema de la optimización automatizada, en tiempo real, del consumo energético del proceso de calentamiento en hornos metódicos de calentamiento de palanquillas en la industria siderúrgica permite establecer que el valor de temperatura para cada zona determina el comportamiento de los restantes parámetros de conducción del horno. La determinación de los valores óptimos de temperatura por zonas, para diferentes productividades y marcas de acero, puede realizarse por el modelo de optimización desarrollado, utilizando como método de solución el La Exploración en una Red de Variables. La generación de valores óptimos de las variables de decisión, en este caso temperaturas por zonas del horno, para diferentes valores de las variables de coordinación, en este caso productividad del horno y marca de acero a laminar, permite hallar Reglas de Conducta que facilitan la automatización del mando del horno, mediante la actuación directa sobre los lazos de control.

Referencias

1. Andreev, S.M., Parsunkin, B.N., *Research work of optimizing control system of process conditions in rolling mills reheating furnaces*. Russian Automation Conference, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1109/rusautocon.2018.8501797>.

2. Andreev, S.M., Parsunkin, B.N., *Billet heating control fuel-saving solution in the rolling mill furnace*. Int. Conf. on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), 2017. p. 1-5. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICIEAM.2017.8076167>.
3. Arzola-Ruiz, J., *Sistemas de Ingeniería* (2da edición), 2012. La Habana: Editorial Félix Valera. ISBN: 978-959-07-1762.
4. Andreev, S.M., Parsunkin, B.N., Lnunova, O.S., *Energy-saving optimal control over heating of continuous cast billets*. The Int. Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015. **79**: p. 1797-1803. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-015-6934-4>.
5. Panferov, V.I., Panferov, S.V., *Modelo exponencial de calentamiento de slabs en hornos metódicos*. Noticias de de la Universidad Estatal del Sur de los Urales. Serie Metalurgia, 2020. **20**(4): p. 67-75. DOI: <https://doi.org/10.14/met200408>.
6. Parsunkin, B.N., Andreev, S.M., Akhmetov, T.U., Bondareva, A.R., *Energy-saving optimal control of fuel combustion in heating furnaces*. Russian Internet Journal of Industrial Engineering, 2013. **1**: p. 20-27. DOI: <http://dx.doi.org/10.24892/RIJIE/20130103>.
7. Andreev, S.M., Parsunkin, B.N., *Search system of fuel combustion control in industrial furnaces*. Int. Conf. on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), 2016. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICIEAM.2016.7910903>.
8. Steinboeck, A., Graichen, K., Kugi, A., *Dynamic Optimization of a Slab Reheating Furnace with Consistent Approximation of Control Variables*. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2011. **19**(6): p. 1444-1456. DOI: <https://doi.org/10.1109/TCST.2010.2087379>.
9. Ryabchikov, M., Ryabchikova, E.S., *Optimizing control system based on integration of competing search optimization algorithms*. Int. Conf. on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), 2017. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICIEAM.2017.8076162>.
10. Krivandin, V.A., Filimonov, Y.P., *Teoría construcción y cálculo de hornos metalúrgicos*. Metalurgia, 1986. Moscú: Ed. MIR:

Conflicto de Intereses

La publicación del artículo no constituye motivo conflictos de intereses.

Contribución de los autores

Luís Suárez García. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1128-3278>.

Participó en la conceptualización, investigación, validación del trabajo y redacción del manuscrito.

José Arzola Ruiz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1128-2245>.

Participó en la conceptualización, investigación, supervisión del trabajo y redacción