

Artículos

Fecha de recepción: 10-05-2025
Fecha de aceptación: 13-08-2025
pp.: 59-75

GUAYANA MODERNA

<https://revistasenlinea.saber.ucab.edu.ve/index.php/guayanamoderna/index>

Optimización automatizada de un Horno Eléctrico de Arco (EAF) en la industria del acero

Automated Optimization of an Electric Arc Furnace (EAF) in the Steel Industry



Néstor Alvarado

Universidad Católica Andrés Bello
Ciudad Guayana, Venezuela

Correo: nalvarado.22@est.ucab.edu.ve

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-3766-5529>

Rubén Arias

Universidad Católica Andrés Bello
Ciudad Guayana, Venezuela

Correo: rsarias.22@est.ucab.edu.ve

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-3910-5948>

Eladio Lobo

Universidad Católica Andrés Bello
Ciudad Guayana, Venezuela

Correo: elobomal@ucab.edu.ve

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7921-2433>

Resumen

El presente estudio se centró en la optimización de los Hornos Eléctricos de Arco (EAF) en la industria del acero, buscando determinar cómo un sistema de control avanzado puede mejorar la eficiencia operativa, la calidad del acero y reducir el impacto ambiental. La metodología empleada combinó una revisión sistemática de la literatura con el desarrollo y validación computacional de un modelo matemático simplificado de la dinámica térmica de un EAF, controlado mediante un algoritmo PID. Los hallazgos de la revisión indican mejoras significativas en la eficiencia energética (reducciones del 3% al 12,3%), la calidad del acero, la productividad (aumentos del 5% al 12%) y la disminución de los costos operativos. La simulación, por su parte, demostró la viabilidad de la regulación precisa de la temperatura. El trabajo propone una arquitectura conceptual para un sistema de control integrado en EAF, discute los desafíos de implementación en la industria venezolana y subraya la relación de esta optimización con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) 7, 9, 12 y 13.

Palabras clave: Horno de Arco Eléctrico, Controlador PID, Calidad del Acero, Industria del Acero, Venezuela, Objetivos de Desarrollo Sostenible.

Guayana Moderna, N° 17
Enero-Junio, 2026
Venezuela

Digital: ISSN 2790-5039 – Depósito legal digital: DC2021001122
Impreso: ISSN 2343-5658 – Depósito legal impreso: PP201202DC4092
ISSN-L (Múltiples Soportes): 2343-5658

Abstract

The present study focused on the optimization of Electric Arc Furnaces (EAF) in the steel industry, aiming to determine how an advanced control system can improve operational efficiency, steel quality, and reduce environmental impact. The methodology employed combined a systematic literature review with the development and computational validation of a simplified mathematical model of the thermal dynamics of an EAF, controlled through a PID algorithm. The findings of the review indicate significant improvements in energy efficiency (reductions from 3% to 12.3%), steel quality, productivity (increases from 5% to 12%), and a decrease in operating costs. The simulation, in turn, demonstrated the feasibility of precise temperature regulation. The work proposes a conceptual architecture for an integrated control system in EAF, discusses the challenges of implementation in the Venezuelan industry, and highlights the relationship of this optimization with Sustainable Development Goals (SDGs) 7, 9, 12, and 13.

Keywords: Electric Arc Furnace, PID Controller, Steel Quality, Steel Industry, Venezuela, Sustainable Development Goals.

Introducción

Este estudio se centró en la optimización de los Hornos de Arco Eléctrico (EAF) mediante la implementación de sistemas de control automatizado, evaluando su potencial para mejorar la eficiencia operativa, la calidad del producto y reducir el impacto ambiental. La investigación se sustentó en una metodología dual que combinó una revisión sistemática de experiencias internacionales con el desarrollo y validación computacional de un modelo matemático de la dinámica térmica del horno, controlado mediante un algoritmo PID. El trabajo se estructuró en tres ejes principales: el análisis de las oportunidades de mejora, el desarrollo de una propuesta técnica de automatización basada en un controlador PID y una

arquitectura de sistema integral, y la evaluación de su aplicabilidad en el contexto específico de la industria venezolana, considerando sus desafíos particulares. Esta aproximación integral busca proporcionar tanto el fundamento teórico como herramientas prácticas para la modernización de estos sistemas productivos, alineándose con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) 7, 9, 12 y 13.

Desarrollo

Control Clásico PID

Imagina que necesitas mantener la temperatura de una habitación exactamente a 24°C con un aire acondicionado. Si hace demasiado calor, lo enciendes; si se enfría

demasiado, lo apagas. Un controlador PID (Proporcional, Integral, Derivativo) es como un sistema automático e inteligente que hace esto por ti, pero de una manera mucho más precisa y eficiente (Smith y Johnson, 2020).

El PID es la base de la automatización industrial debido a su simplicidad y robustez (Ogata, 2010). Opera mediante la realimentación continua del error $e(t)$, definido como la diferencia entre el setpoint $r(t)$ y la variable medida $y(t)$. La señal de control $u(t)$ se calcula según Åström y Hägglund (2001) como:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \left(\frac{de(t)}{dt} \right) \quad (1)$$

Donde:

K_p : Ganancia proporcional

K_i : Ganancia integral

K_d : Ganancia derivativa

$e(t)$: Error entre el valor deseado y el valor medido

$u(t)$: Señal de control enviada al sistema.

En un Horno de Arco Eléctrico (EAF), este sistema es fundamental para controlar con precisión la temperatura del acero fundido, asegurando que no se gaste energía de más y que la calidad del acero sea

consistente (Ogata, 2010).

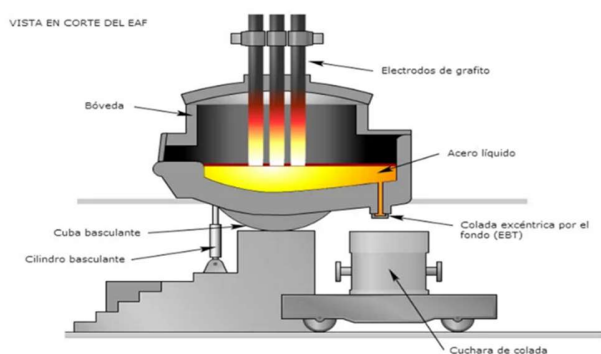
Funcionamiento del Horno de Arco Eléctrico (EAF)

El Horno de Arco Eléctrico (EAF) es una tecnología fundamental para la producción de acero a partir del reciclaje de chatarra, operando mediante un proceso por lotes conocido como ciclo de colada a colada (tap-to-tap). Este ciclo consta de varias etapas críticas:

1. Carga, donde se introduce chatarra prensada en el horno.
2. Fusión, etapa crucial en la que electrodos de grafito generan arcos eléctricos que elevan la temperatura hasta $\sim 1800^\circ\text{C}$ para fundir el metal;
3. Refinado, donde se inyectan aditivos para formar una escoria que elimina impurezas.
4. Vaciado (Tapping), en el que el acero fundido se extrae para su posterior procesamiento.
5. Preparación, donde se realiza el mantenimiento inicial para reiniciar el ciclo. La automatización de este proceso se sustenta

en tres pilares interconectados: medición en tiempo real (sensores como pirómetros y analizadores de gases), control automático (sistemas computacionales que ejecutan algoritmos como PID) y actuación (mecanismos que ajustan electrodos, flujos de gas e inyección de materiales) (Endress+Hauser, s.f.).

Figura 1: Vista en corte de un Horno de Arco Eléctrico.



Fuente:

<https://blog.laminasyaceros.com/blog/procesos-de-fabricaci%C3%B3n-del-acero-el-arco-el%C3%A9ctrico>

Arquitectura de un Sistema de Control Avanzado para EAF

La automatización exitosa de un EAF requiere de una arquitectura de sistema organizada por capas, basada en el estándar ISA-95 y análoga a los niveles de mando en una empresa (International Society of

Automation, 2020), ver la figura 2. Esta estructura garantiza que la información fluya desde los sensores en el piso de producción hasta la gestión superior, y que las decisiones se ejecuten de manera eficiente y coordinada. La arquitectura integral propuesta se compone de los siguientes cuatro niveles interconectados:

Capa de Campo: constituye la base física del sistema. En esta capa operan los sensores (pirómetros, analizadores de gases, sensores de nivel y electricidad) que actúan como los sentidos, midiendo en tiempo real las variables críticas del proceso de fusión. También incluye los actuadores (mecanismos de elevación de electrodos, válvulas de control de flujo de gases y sistemas de inyección de carbono), que funcionan como las manos que ejecutan las acciones físicas sobre el horno.

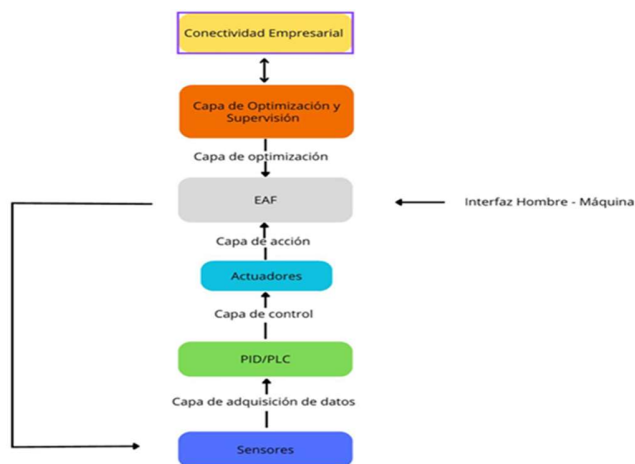
Capa de Control: funciona como el cerebro operativo automatizado. Aquí, Controladores Lógicos Programables (PLCs) o Sistemas de Control Distribuido (DCS) reciben continuamente los datos de los sensores, ejecutan en tiempo real los algoritmos de control (como el PID, lógica difusa o predictivo) y envían las órdenes de

control necesarias a los actuadores para regular de forma autónoma la potencia del arco, el posicionamiento de electrodos y los flujos de materiales.

Capa de Supervisión y Optimización (HMI/SCADA): opera como el cerebro estratégico. Un sistema supervisorio (SCADA) o interfaz hombre-máquina (HMI) recopila, almacena y visualiza los datos de todo el proceso para los operadores. Además, en este nivel se ejecutan aplicaciones de software avanzado que utilizan modelos matemáticos y de optimización para analizar el proceso completo, calcular la receta óptima que minimice el consumo energético y el tiempo de ciclo, y enviar setpoints de alto nivel a los controladores de la capa inferior.

Capa Empresarial: representa el nivel de gestión y negocio. Los sistemas de planificación de recursos empresariales (ERP) reciben información agregada de la producción (toneladas producidas, energía total consumida, costos operativos) para la planificación a largo plazo, gestión de inventarios, análisis de rentabilidad y toma de decisiones estratégicas, integrando así la operación del horno con los objetivos financieros de la empresa.

Figura 2: Diagrama de la arquitectura jerárquica propuesta para un sistema de control avanzado de EAF.



Fuente: Elaboración propia basada en ISA-95, 2020.

Sistemas de Control Avanzado

Los sistemas de control avanzado van más allá del PID básico, utilizando inteligencia artificial y modelos predictivos para tomar el control del horno al siguiente nivel (PHM Society, 2023).

Control Predictivo: Utiliza modelos matemáticos para anticipar el comportamiento del horno

Lógica Difusa: Emula el razonamiento de operadores expertos mediante reglas heurísticas

Optimización Integral: Analiza

múltiples variables simultáneamente para optimizar todo el proceso

Modelado, Simulación y Ecuación Diferencial

Antes de implementar un costoso sistema de control en un horno real, los ingenieros pueden probarlo de manera virtual mediante modelado y simulación.

Imagina que quieres predecir cómo se calentará una taza de agua en una cocina. Puedes describir este comportamiento con una ecuación diferencial basada en el balance de energía: la tasa de cambio de la temperatura del agua depende de la potencia del fuego (que la calienta) menos el calor que pierde al ambiente.

Para un EAF, la ecuación es conceptualmente similar, pero a una escala mayor:

El modelo de dinámica térmica se deriva del balance de energía, representado por la ecuación diferencial de primer orden (Oosthuizen et al., 2004):

$$\tau (dT(t))/dt + T(t) = KQ(t) \quad (2)$$

Donde:

T: Temperatura actual.

K: Ganancia.

: Constante de tiempo

dT/dt : Representa la velocidad a la que cambia la temperatura del acero.

Q(t): Es la potencia del arco eléctrico (el "fuego").

La función de correspondencia es:

$$G(s) = (T(s))/(Q(s)) = K/(\tau s + 1) \quad (3)$$

Al resolver esta ecuación con herramientas computacionales como Python, se puede simular el comportamiento del horno y probar cómo un controlador PID virtual sería capaz de llevar la temperatura al valor deseado de manera estable y eficiente, tal como se muestra en la figura resultante de la simulación.

Antecedentes

En el ámbito del control, la evolución de las estrategias refleja los avances en la teoría de control y la capacidad computacional. Woodside (1970) sentó las bases teóricas con un concepto para el control óptimo de EAF utilizando el principio de máximo de

Pontryagin. Investigaciones posteriores se centraron en el desarrollo de modelos matemáticos para describir la parte eléctrica del EAF y su interacción con la red (Montanari et al., 1994; Tseng et al., 1997; Collantes-Bellido y Gómez, 1997).

Un salto significativo lo dio la incorporación de la modelización termodinámica. Bekker et al. (1999) desarrollaron un modelo implementando relaciones termodinámicas para la simulación del EAF, el cual fue posteriormente ampliado por Oosthuizen et al. (2001, 2004) para incluir un modelo de escoria espumosa y un controlador óptimo destinado a reducir costos operativos. La creciente comprensión de la complejidad del sistema llevó a enfoques integrales, como el modelo completo de MacRosty y Swartz (2005, 2007) que consideraba aspectos químicos, de masa y de transferencia de calor, y los modelos multifísicos de Logar et al. (2011, 2012) que abarcaban procesos eléctricos, hidráulicos, químicos y de transferencia de calor y masa.

En la era contemporánea, la aplicación de la inteligencia artificial (IA) y el aprendizaje automático (ML) ha ganado

prominencia. Andonovski y Tomažič (2022) compararon modelos basados en datos para predecir y optimizar el consumo de energía, mientras que Manojlović (2022) evaluó parámetros de eficiencia energética utilizando diferentes métodos de ML. Esta trayectoria, desde modelos puramente eléctricos hasta la integración de técnicas avanzadas de IA, subraya el esfuerzo continuo por abordar las complejidades del proceso y establece el marco para las contribuciones de este estudio, que se centra en la validación de un controlador PID para la estabilidad térmica y la propuesta de una arquitectura de sistema integrado.

Metodología

Para complementar y validar los hallazgos de la revisión literaria, se llevó a cabo un estudio de modelado y simulación. Esta fase tuvo como objetivo traducir los principios teóricos a un entorno práctico y demostrable, probando la viabilidad de un sistema de control para la dinámica térmica de un EAF.

Desarrollo del Modelo Térmico

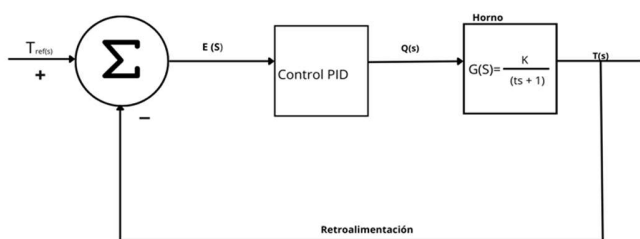
Se derivó un modelo matemático simplificado de primer orden a partir de un balance de energía fundamental, representativo de la alta inercia térmica característica de un EAF industrial (Oosthuizen et al., 2004). La función de transferencia resultante, $G(s)=K/(\tau s+1)$ (con ganancia $K=1$) y constante de tiempo ($\tau=100s$), captura la relación entre la potencia de entrada aplicada y la temperatura del baño de acero.

Implementación del Control y Diseño Experimental

El modelo fue implementado en un entorno de simulación utilizando el lenguaje de programación Python, aprovechando librerías científicas como NumPy, SciPy y Matplotlib para el cálculo y la visualización. Sobre este modelo de la planta (el horno), se diseñó e implementó un controlador Proporcional-Integral-Derivativo (PID). El experimento simulado consistió en aplicar un cambio en el setpoint de temperatura (escalón) y observar la respuesta del sistema controlado en un lazo cerrado (Figura 3). El objetivo era demostrar la capacidad del

controlador PID para lograr una regulación estable, con un tiempo de establecimiento aceptable y un sobreimpulso mínimo, validando así su potencial para mejorar la eficiencia energética y la consistencia operativa.

Figura 3 Diagrama del lazo de control en lazo cerrado para la temperatura del EAF.



Fuente: elaboración propia.

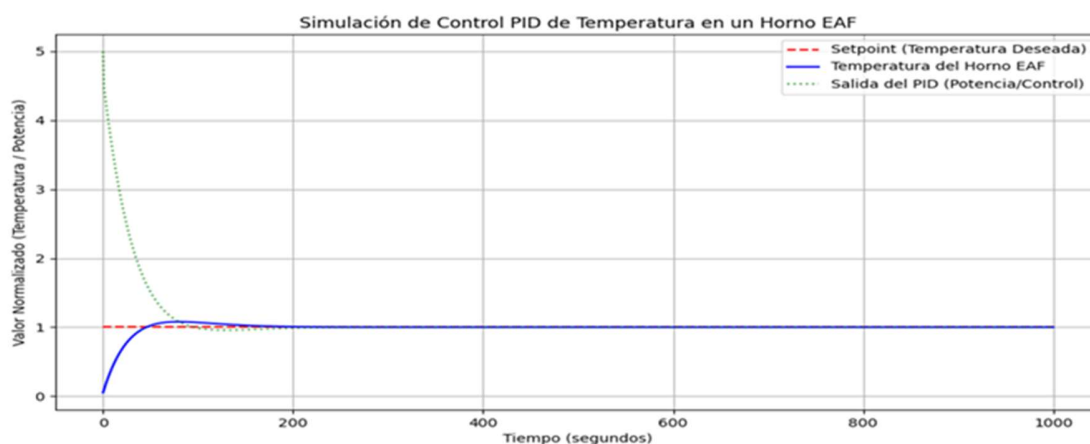
Análisis de la Respuesta del Sistema y Validación

Los resultados de la simulación, mostrados en la Figura 4, demostraron que un controlador PID adecuadamente sintonizado (con parámetros $P=5,0$; $I=0,1$; $D=10,0$) es capaz de llevar la temperatura del horno al setpoint deseado de manera estable y con un sobreimpulso controlado.

La curva de temperatura refleja el típico comportamiento de un sistema de primer orden controlado por PID: un ascenso exponencial, un ligero sobrepico y una posterior estabilización precisa. La señal de control confirma que el algoritmo responde de manera agresiva al error inicial y luego

modera su acción para evitar desperdicios energéticos, cumpliendo con el objetivo de mantener la estabilidad a pesar de la gran inercia del sistema. Esta validación computacional constituye la prueba fundamental de que la regulación precisa de la temperatura es técnicamente viable.

Figura 4: Respuesta de la temperatura del EAF y la acción de control del PID.



Fuente: Elaboración propia.

Resultado de la simulación que muestra la respuesta de la temperatura del EAF (línea azul) bajo el control de un algoritmo PID frente a un cambio en el setpoint. La línea naranja representa la acción de control.

Beneficios y Desafíos de la Automatización en EAF

La implementación de sistemas de control avanzado en Hornos de Arco Eléctrico reporta mejoras cuantificables, aunque su adopción enfrenta obstáculos considerables que deben ser gestionados. La

evidencia internacional, recopilada en la revisión literaria y ejemplificada en la Tabla 1, demuestra impactos directos en los indicadores clave de desempeño.

Beneficios Documentados:

Eficiencia Energética: Reducciones en el consumo de energía entre 3% y 12,3%

Productividad: Acortamiento de ciclos operativos, con aumentos de producción entre 5% y 12%

Calidad del Producto: Mayor consistencia en composición química y reducción de impurezas

Sostenibilidad: Disminución de emisiones de CO₂ y otros contaminantes

Reducción de Costos: Ahorro significativo en costo por tonelada de acero producida.

Desafíos de Implementación:

Alta Inversión Inicial: Costo elevado de sensores, hardware y software especializado

Complejidad de Integración: Dificultades técnicas para conectar nuevos sistemas con infraestructura existente

Escasez de Personal Calificado: Falta de ingenieros y técnicos con formación especializada en automatización

Variabilidad del Proceso: Naturaleza dinámica del arco eléctrico y composición impredecible de la chatarra

Resistencia al Cambio: Necesidad de programas de capacitación y gestión del cambio para personal experto

Caso Venezolano: Estos desafíos se amplifican debido a la crisis económica prolongada, suministro eléctrico deficitario e inestable, y la significativa fuga de cerebros (éxodo de profesionales calificados). Este contexto hace que la modernización tecnológica requiera además desarrollo de capacidades locales, cooperación internacional y gestión estratégica que priorice la modernización industrial como política de Estado.

Resultados

La investigación realizada, que combinó una revisión sistemática de la literatura con un estudio de modelado y simulación computacional, arrojó hallazgos significativos en varias áreas clave para la

optimización de los Hornos de Arco Eléctrico (EAF). Estos resultados demuestran el potencial de los sistemas de control avanzado para mejorar simultáneamente la eficiencia operativa, la calidad del producto y el desempeño ambiental.

Hallazgos de la Revisión de Literatura

El análisis de literatura revela que la

automatización de EAF genera mejoras medibles en eficiencia energética y productividad. Como se detalla en la Tabla 1, los casos documentados muestran rangos de reducción de consumo energético entre 3-12.3% y aumentos de productividad de 5-12%, dependiendo de las tecnologías específicas implementadas y las condiciones operativas previas.

Tabla 1: Ejemplos de beneficios de sistemas de control avanzado en EAFs

Beneficio		Métrica	Valor de Mejora
Eficiencia Energética	Consumo de Energía		-7,1%
Eficiencia Energética	Consumo de Energía Eléctrica		-5 kWh/t
Eficiencia Energética	Consumo de Energía		-8%
Eficiencia Energética	Consumo de Energía Eléctrica y Metano		-12,3% y -33%
Consumo de Electrodo	Consumo de Electrodo		-20%

Beneficio	Métrica	Valor de Mejora
Tiempo de Encendido	Tiempo de Encendido	-4 minutos
Productividad	Productividad	+8 t/h
Tiempo Entre Coladas	Tiempo Entre Coladas	-2,4 minutos
Consumo de Energía Eléctrica	Energía Eléctrica	-25 kWh/t

Fuente: Elaboración propia a partir de la compilación de fuentes citadas en las referencias.

Resultados de la Simulación del Modelo Térmico

El estudio de simulación del modelo térmico simplificado del EAF bajo control PID proporcionó una validación computacional crucial:

Comportamiento del Modelo: El modelo de primer orden, con una constante de tiempo de 100 segundos, capturó eficazmente la alta inercia térmica característica de un EAF industrial, demostrando una respuesta lenta pero predecible a los cambios en la potencia de entrada, lo que valida su idoneidad para el análisis.

Rendimiento del Control PID: La simulación demostró que un controlador PID adecuadamente sintonizado (con parámetros $P=5,0$; $I=0,1$; $D=10,0$) es capaz de llevar la temperatura del horno al setpoint deseado de manera estable y con un sobreimpulso controlado. Como se muestra en la Figura 3, la temperatura converge suavemente hacia el valor de referencia, confirmando la capacidad del controlador para mantener la estabilidad a pesar de la gran inercia del sistema.

Implicaciones para la Optimización: Los resultados gráficos validan que la regulación precisa de la temperatura es técnicamente viable mediante estrategias de

control clásicas como el PID. Esta estabilidad es un factor crítico para minimizar las pérdidas de calor por fluctuaciones y asegurar condiciones óptimas para las reacciones metalúrgicas, sentando las bases para los beneficios de eficiencia y calidad identificados en la revisión literaria.

Alineación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)

El análisis cruzado de los resultados confirma una fuerte sinergia entre la optimización técnica del EAF y varios Objetivos de Desarrollo Sostenible, lo que subraya el impacto positivo más allá de la rentabilidad empresarial:

ODS 7 (Energía Asequible y No Contaminante): Las mejoras en eficiencia energética contribuyen directamente a la Meta 7.3 (duplicar la tasa de mejora de la eficiencia energética) y a la Meta 7.a (fortalecer la cooperación internacional para el acceso a tecnología energética).

ODS 9 (Industria, Innovación e Infraestructura): La modernización de los EAF mediante control avanzado se alinea con la Meta 9.4 (modernizar infraestructuras para

que sean sostenibles con un uso más eficiente de los recursos).

ODS 12 (Producción y Consumo Responsables): La optimización del proceso impulsa el cumplimiento de la Meta 12.2 (gestión sostenible y uso eficiente de los recursos naturales) y la Meta 12.5 (reducción sustancial de la generación de desechos).

ODS 13 (Acción por el Clima): La reducción de emisiones de CO₂ resultante de un menor consumo energético contribuye directamente a la mitigación del cambio climático.

En síntesis, los resultados demuestran de manera integral que la optimización automatizada del EAF, lejos de ser una mera mejora operativa, se erige como una estrategia poderosa que conjuga beneficios económicos tangibles (ahorro de costos, mayor productividad) con avances significativos en sostenibilidad industrial y responsabilidad ambiental. La validación computacional del control PID para la estabilidad térmica proporciona una base técnica sólida para la implementación práctica de estos sistemas, incluso en entornos desafiantes como la industria venezolana.

Discusión

Los hallazgos confirman que las mejoras en eficiencia energética (3-12.3%) y productividad (5-12%) documentadas en la literatura son alcanzables mediante la implementación de sistemas de control avanzado. Estos resultados demuestran el potencial de la automatización para abordar simultáneamente objetivos económicos y ambientales, aunque su implementación efectiva requiere superar desafíos técnicos y contextuales.

Una limitación de este estudio es su dependencia de modelos simplificados y simulaciones computacionales, lo que, si bien valida la viabilidad técnica del control PID, no captura la total complejidad de un EAF operativo. Futuras investigaciones deberían enfocarse en la implementación práctica mediante estudios de casos específicos y el análisis cuantitativo de la viabilidad técnica y económica en entornos industriales reales, considerando particularmente las restricciones propias de economías en desarrollo.

En síntesis, la optimización de EAF mediante control avanzado representa una oportunidad estratégica que integra

beneficios operativos, económicos y ambientales, sentando las bases para una industria siderúrgica más sostenible y competitiva.

Conclusiones

Este estudio demuestra que la implementación de sistemas de control avanzado en EAF permite alcanzar mejoras significativas en eficiencia energética y productividad, consistentes con los rangos reportados en la literatura internacional (3-12.3% y 5-12% respectivamente). Estos beneficios, validados mediante simulación computacional, posicionan a la automatización como una estrategia clave para la modernización sostenible de la industria siderúrgica.

La simulación computacional valida la efectividad del control PID para manejar la alta inercia térmica característica de los EAF, proporcionando una base sólida para el diseño de sistemas de control en entornos reales. Además, la propuesta de una arquitectura jerárquica basada en el estándar ISA-95 facilita la integración de sensórica, control y gestión, sentando las bases para una implementación escalable y alineada con los

principios de la Industria 4.0.

Si bien los beneficios son claros, su implementación —especialmente en contextos como el venezolano— enfrenta desafíos significativos que trascienden lo técnico, incluyendo limitaciones económicas, deficitario suministro eléctrico, escasez de talento especializado y barreras geopolíticas. Superar estos obstáculos requerirá no solo inversión en tecnología, sino también desarrollo de capacidades locales, cooperación internacional y una gestión estratégica que priorice la modernización industrial como política de Estado.

Esta optimización se alinea directamente con múltiples Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), destacando su papel no solo como mejora operativa, sino como contribución al acceso a energía asequible y no contaminante (ODS 7), al desarrollo de infraestructuras resilientes y sostenibles (ODS 9), a la producción y el consumo

responsables (ODS 12) y a la acción por el clima (ODS 13).

En este escenario, el ingeniero industrial emerge como un actor clave —un integrador multinivel— capaz de tender puentes entre la tecnología operativa, los sistemas de información y la gestión de recursos, asegurando que las soluciones técnicas sean tanto innovadoras como económicamente viables y socialmente responsables.

Futuras investigaciones deberían orientarse hacia el desarrollo de controladores adaptativos capaces de compensar la variabilidad de la materia prima, así como al diseño de arquitecturas de bajo costo para su adopción en plantas con recursos limitados. La transferencia tecnológica, el fortalecimiento de capacidades locales y la voluntad política serán esenciales para materializar el potencial de la automatización en la industria siderúrgica venezolana y global.

Referencias:

- Andonovski, G., & Tomažič, S. (2022). "Data-based models for prediction and optimization of energy consumption in electric arc furnaces". *Journal of Process Control*, 110, 1--10. <https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2022.01.005>
- Åström, K. J., & Hägglund, T. (2001). "The future of PID control". *Control Engineering Practice*, 9(11), 1163--1175. [https://doi.org/10.1016/S0967-0661\(01\)00062-4](https://doi.org/10.1016/S0967-0661(01)00062-4)
- Bekker, J. G., Craig, I. K., & Pistorius, P. C. (1999). "Modeling and simulation of an electric arc furnace process". *ISIJ International*, 39 (1), 23--32.
- Collantes-Bellido, R., & Gómez, T. (1997). "Identification and modeling of a three phase arc furnace for voltage disturbance simulation". *IEEE Transactions on Power Delivery*, 12(4), 1812--1817.
- Endress+Hauser. (s.f.). *Producción de acero económico*. Recuperado de <https://www.ar.endress.com/es/experiencia-en-la-industria/aumentar-seguridad-legislacion-ambiental/produccion-acero-economica>
- International Society of Automation. (2020). *ISA-95: Enterprise-control system integration*. ISA.
- Logar, V., Dovžan, D., & Škrjanc, I. (2011). "Modeling and validation of an electric arc furnace: Part 1, heat and mass transfer". *ISIJ International*, 51(3), 382--391.
- Logar, V., Dovžan, D., & Škrjanc, I. (2012). "Modeling and validation of an electric arc furnace: Part 2, control system for the electrode position". *ISIJ International*, 52(3), 402--412.
- MacRosty, R. D. M., & Swartz, C. L. E. (2005). "Dynamic modeling of an industrial electric arc furnace". *Proceedings of the 2005 American Control Conference*, 3, 1914--1919.
- MacRosty, R. D. M., & Swartz, C. L. E. (2007). "Dynamic modeling of an industrial electric arc furnace". *Computers & Chemical Engineering*, 31(5-6), 658--668. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2006.12.005>
- Manojlović, V. (2022). "Evaluation of energy efficiency parameters in electric arc furnaces using machine learning methods". *Journal of Cleaner Production*, 330, 129821. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129821>
- Montanari, G. C., Loggini, M., Cavallini, A., Pitti, L., & Zaninelli, D. (1994). "Arc furnace model for the study of flicker compensation in electrical networks". *IEEE Transactions on Power Delivery*, 9(4), 2026--2036.
- Ogata, K. (2010). *Modern control engineering* (5th ed.). Prentice Hall.
- Oosthuizen, D. J., Craig, I. K., & Pistorius, P. C. (2001, 2004). "A model for electric arc furnace operation". *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*, 101(1), 15--22; 104(5), 277--284.
- Smith, R., & Johnson, L. (2020). *Industrial automation and process control: Principles and applications*. Springer.

Tseng, K. J., Wang, Y., & Vilathgamuwa, D. M. (1997). "An experimentally verified hybrid Cassie-Mayr electric arc model for power electronics simulations". *IEEE Transactions on Power Electronics*, 12 (3), 429--436.

Woodside, C. M. (1970). "Optimal control of the electric arc furnace". *Automatica*, 6(3), 383--390. [https://doi.org/10.1016/0005-1098\(70\)90094-5](https://doi.org/10.1016/0005-1098(70)90094-5)