



Índice de estabilidad de arco basado en la impedancia de fase para Hornos de Arco Eléctrico

Arc stability index based on phase impedance for Electric Arc Furnaces

Yainier Albuérne Castro^I, Mercedes Ramírez Mendoza^{II, *}, Guillermo González Yero^{III}, Félix Vladimir Roldán Jiménez^{II}

^I ETECSA, Las Tunas, Cuba

^{II} Universidad de Oriente, Santiago de Cuba, Cuba

^{III} CONTROL-Xi, SRL Las Tunas, Cuba

* Autor de la correspondencia: mramirezmandoza512@gmail.com

Recibido: 18 de abril de 2026

Aprobado: 15 de agosto de 2026

Este documento posee una [licencia Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0 internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)



RESUMEN/ABSTRACT

El artículo abordó la estabilidad de arco en los hornos de arco eléctrico, destacando su impacto en la eficiencia energética. El objetivo fue proponer un índice de estabilidad basado en la impedancia de fase. Se aplicaron métodos comparativos con índices previos y se integró el cálculo en estrategias de control de electrodos y de potencia, validándose en el HAE de Acinox Las Tunas. Los resultados mostraron que el índice propuesto reflejó con precisión la evolución del proceso de fusión, detectó eventos transitorios de inestabilidad logrando una reducción del 12 % en extinciones de arco y un ahorro energético estimado en 16.24 millones de pesos anuales. La conclusión más relevante fue que este índice constituye una alternativa práctica y robusta para mejorar el control de electrodos y de potencia y optimizar la eficiencia energética en hornos de arco eléctrico.

Palabras clave: estabilidad de arco; impedancia de fase; horno de arco eléctrico; control de electrodos; control de potencia; eficiencia energética.

The article addressed arc stability in electric arc furnaces, highlighting its impact on energy efficiency. The objective was to propose a stability index based on phase impedance. Comparative methods with previous indices were applied, and the calculation was integrated into electrode and power control strategies, validated in the Acinox Las Tunas EAF. Results showed that the proposed index accurately reflected the evolution of the melting process, detected transient instability events, achieved a 12% reduction in arc extinctions, and provided an estimated energy saving of 16.24 million pesos annually. The most relevant conclusion was that this index constituted a practical and robust alternative to improve electrode and power control and optimize energy efficiency in electric arc furnaces.

Keywords: arc stability; phase impedance; electric arc furnace; electrode control; power control; energy efficiency.

INTRODUCCIÓN

En los hornos de arco eléctrico de corriente alterna (HAE-CA), la fusión de chatarra se produce mediante la conversión de energía eléctrica en térmica a través del arco eléctrico. La estabilidad del arco tiene un impacto directo en la optimización de las operaciones del horno, mejorando la entrega de energía y la eficiencia global del proceso [1]. Un arco inestable puede extinguirse durante el cruce por cero de la corriente, lo que genera interrupciones en el proceso y reduce de manera significativa la eficiencia energética del horno.

Cómo citar este artículo:

Yainier – Albuérne Castro y otros. Índice de estabilidad de arco basado en la impedancia de fase en Hornos de Arco Eléctrico. Ingeniería Energética. Vol. 47(2026): publicación continua. ISSN 1815-5901.

Sitio de la revista: <https://rie.cujae.edu.cu/index.php/RIE/index>

El control adecuado de la energía eléctrica resulta esencial para mantener la continuidad del proceso de fusión con mínimas intervenciones, evitando así consumos energéticos excesivos. La monitorización de la estabilidad del arco permite al operador ajustar dinámicamente la potencia: incrementándola cuando el arco presenta buena estabilidad, o reduciéndola cuando esta se deteriora. Esta estrategia no solo reduce las pérdidas de energía, sino que además incrementa la productividad y la transferencia de calor al baño de metal [2], reduce el desgaste de los electrodos y del refractario, y disminuye las perturbaciones en la red eléctrica (flicker). Para implementar este enfoque, se han desarrollado diversos métodos de estimación de los índices de estabilidad del arco, junto con elementos de medición especializados, que permiten monitorear las condiciones internas del HAE y ejercer un control más preciso sobre la potencia suministrada, alcanzando así mayores niveles de eficiencia en el proceso de fusión.

En años recientes, la automatización y el control adaptativo de estos hornos se han enfocado en el monitoreo de la impedancia de fase para ajustar de manera precisa la posición de los electrodos. En [3], se demuestra que el uso de la impedancia como variable de estado refleja con mayor fidelidad la física y la dinámica interna del horno en comparación con el uso aislado de la tensión o la corriente. A pesar de los avances en técnicas de estimación, la mayoría de los métodos requieren una alta complejidad computacional y sistemas de adquisición de señales acústicas o armónicas complejas [4].

El objetivo de este trabajo es proponer un nuevo índice de estabilidad basado en la impedancia de fase, un índice que no solo cuantifica la dispersión de la impedancia, sino que constituye una señal directamente utilizable en la lógica de control de electrodos y en el ajuste automático de la entrega de potencia. En la práctica industrial, cuando el valor de este índice supera un umbral predefinido, se interpreta como inestabilidad del arco. El sistema de control de electrodos puede entonces ordenar un ajuste rápido de la posición del electrodo correspondiente: acortando ligeramente la longitud del arco si la impedancia es demasiado alta, o alargándola si es muy baja, mientras que el sistema de control de potencia, de acuerdo a la relación de cada índice de fase, puede disminuir la entrega de potencia y aumentarla cuando detecte una etapa más estable en dependencia del valor de este indicador general de estabilidad del arco eléctrico. Esto permite restablecer condiciones estables en menos de 200 ms, reduciendo el flicker y mejorando la transferencia de potencia.

El índice permite obtener una evaluación precisa del comportamiento del arco, de la etapa del proceso de fusión, un indicador de la efectividad del control de electrodos y puede ser empleado como variable de control por este sistema así como por el controlador de potencia. El artículo describe el desarrollo del índice, su validación en el entorno industrial y la simplicidad de su implementación para mejorar la eficiencia del proceso de fusión.

MATERIALES Y MÉTODOS

En los momentos iniciales del estudio de la estabilidad del arco se consideró la distorsión armónica total (THD, del inglés *Total Harmonic Distortion*) para determinar la misma [3]. La distorsión armónica posee el valor más alto durante la perforación inicial y la fusión temprana y va disminuyendo a medida que se derrite la chatarra metálica hasta alcanzar el valor más bajo durante el refinado y las etapas de sobrecalentamiento. La cantidad de armónicos generados depende de cada etapa del proceso de fusión [3]. Una de las desventajas que se le atribuía inicialmente a la estimación del índice de estabilidad del arco eléctrico mediante el análisis del contenido armónico era que para su obtención se requería del uso de la transformada de Fourier, pero con el desarrollo de la tecnología esto ya no es un impedimento, por lo que en la actualidad existen investigadores que aún defienden esta vía, un ejemplo lo podemos encontrar en [4]. En este mismo trabajo, sin embargo, los autores expresan que otra desventaja de este método es que se requiere el empleo de filtros de media móvil con una constante de tiempo de filtración amplia debido a la fuerte influencia de la longitud del arco y el desequilibrio de fase en la composición armónica de la corriente del arco; apuntando que la información sobre las etapas intermedias de la fusión con una duración cercana a la constante de tiempo de filtración se puede perder [4].

En otros artículos se evalúa la estabilidad de arco de un horno de CA en el dominio de tiempo, empleando cálculo numérico, un ejemplo de ello es el modelo de arco de Cassie-Mayr, un modelo clásico ampliamente referenciado bien conocido por representar con éxito las características del arco [5]. A partir de dicho modelo otros autores han logrado deducir que la inclinación de la corriente del arco en la corriente cero (CZ) suprime la resistencia máxima del arco cerca de CZ a un valor bajo manteniendo el arco estable. Este análisis es teóricamente valioso, pero se enfoca solo en el cruce por cero de la corriente de arco, sin tener en cuenta el patrón de voltaje/corriente de arco.

En [6], se presenta un modelo no lineal del arco eléctrico, el cual se valida comparando sus resultados con medidas de estabilidad del mundo real, haciendo de esta una buena fuente para entender los parámetros que definen la misma. Si bien es cierto que los métodos basados en modelos matemáticos constituyen una herramienta poderosa para el diseño y simulación, en investigación y desarrollo o como parte de sistemas híbridos, como toda aproximación teórica poseen una serie de desventajas significativas que pueden limitar su aplicación en entornos industriales reales. Entre estas podemos mencionar: la complejidad de su desarrollo y validación, la falta de precisión y generalización, alta sensibilidad a cambios en las condiciones de operación, elevado costo computacional y de implementación, dificultad para medir variables críticas en tiempo real, requiriendo mantenimientos frecuentes y monitoreo y ajustes para compensar los cambios del Sistema.

Por lo general los investigadores que tratan el tema de la estabilidad del arco analizan la estabilidad general del arco, lo cual aporta mucho para el desarrollo del control de potencia en los HAE, sin embargo, suele tratarse escasamente la estabilidad de cada fase, la cual es importante para lograr una mejor sintonía del controlador de los electrodos, con el control de cada electrodo por separado. En [3] se propone un índice de estabilidad de fase del arco en base a los valores RMS y de THD de tensión y corriente de fase en los HAE, se trata de un método interesante que depende de varias variables e implica una carga de cálculo significativa, aunque tiene como ventaja que también permite la obtención de un índice general de la estabilidad del arco a partir de los propios índices de fase.

Existen propuestas de índices de estabilidad del arco donde solo se considera la forma de onda de la tensión de fase. Teniendo en cuenta que la corriente es la que indica la ignición del arco resulta ser más significativa que la tensión, el hecho de que este índice de estabilidad no contenga la forma de onda de la corriente constituye una desventaja. Para superar este problema, Blazic, Škrjanc y Logar en [7] analizan el comportamiento del arco mediante modelos trifásicos dinámicos basados en las ecuaciones de Cassie–Mayr, integrando de forma explícita las fluctuaciones instantáneas de tensión y corriente de fase. A partir de este enfoque dinámico, los autores desarrollan un Índice de Calidad del Arco (AQI) que evalúa la estabilidad operativa y se vincula con la eficiencia de la transferencia de energía en el horno. Una importante ventaja de este método es que modela la naturaleza no lineal del arco, permitiendo su acoplamiento con la estrategia de control [8] para que el regulador de posición de electrodos optimice su punto de consigna en tiempo real. Además, dicho método presenta un excelente desempeño para identificar los cambios de estado en el arco, sin embargo, su implementación computacional es elevada debido a la necesidad de resolver las ecuaciones diferenciales del modelo y requiere un cálculo preciso de los parámetros dinámicos en cada etapa de la fusión.

Otras formas para la estimación de las condiciones del arco se logran por la vía del procesamiento de las vibraciones y el sonido. Inicialmente Siemens VAI (Alemania) presentó la idea de usar señales de vibración para determinar el nivel de la escoria espumosa al final de cada etapa de fusión. Sin embargo, las pruebas en un HAE de 180 MVA mostraron que las señales de vibración también pueden ser usadas para diagnosticar la estabilidad del arco eléctrico. Este método se usa en el sistema de control de potencia SimetalSimelt (Alemania) [4]. En [9], aparece una propuesta basada en señales acústicas que demostró excelentes resultados al compararlo con otros métodos. En la misma, además de la obtención de un índice de arco general también se obtienen los índices de fase, para lo cual se logró definir un rango de señal inmune a las perturbaciones asociadas con el ruido industrial, eliminando una de las principales desventajas de los métodos no invasivos basados en señales acústicas. El método que emplea el análisis de las vibraciones tiene la desventaja de que los sensores necesarios tienen un alto costo y además presentan un pobre funcionamiento bajo las severas condiciones de trabajo de los HAE [4]. Por otro lado, los métodos basados en el sonido precisan un menor costo en equipamiento necesario para procesar las señales acústicas; no obstante, en aquellas plantas que disponen de más de un HAE, así como otros elementos que pueden interferir o generar sonidos dentro del rango de señal definido para el fin planteado, puede no resultar efectivo su empleo.

Entre los métodos más avanzados se encuentran aquellos que aplican técnicas de inteligencia artificial (IA) desarrollando sistemas que aprenden del comportamiento óptimo del horno. Los mismos tienen como principio entrenar un modelo con grandes cantidades de datos históricos correspondientes a períodos de operación tanto estable como inestable, el modelo aprende a predecir un índice de estabilidad o a detectar patrones precursores de inestabilidad. Investigaciones recientes han demostrado la utilidad de estas técnicas: Dehestani y Alizadeh [10] identificaron parámetros de modelos de plasma en hornos de arco eléctrico mediante mediciones en el secundario del transformador, Van Ende [11] analizó el comportamiento del horno con modelos de simulación avanzados, Nikolaev et al. [12] aplicaron aprendizaje profundo para estimar armónicos y compensar flicker en HAE; Rippon et al. [13] demostraron el potencial del aprendizaje representativo para predecir pérdidas de arco, Guerra-Serrano et al. [9] integraron índices de estabilidad basados en señales acústicas en sistemas de control de potencia, Klimas y Grabowski [14] aplicaron redes LSTM para modelar el comportamiento del horno, y Akinci et al. [15] propusieron un marco híbrido basado en STFT y aprendizaje automático para clasificación de estabilidad. Estas contribuciones evidencian que la propuesta se alinea con las tendencias actuales en control inteligente y eficiencia energética en hornos de arco eléctrico.

Entre las ventajas que poseen estas variantes se encuentran: son sistemas que pueden predecir la inestabilidad antes de que se manifieste, permitiendo acciones correctivas; son altamente adaptables pues se acomodan a las características específicas de cada horno y a los cambios en los materiales de carga; además son tolerantes al ruido y a datos incompletos; las redes neuronales bien entrenadas son muy robustas. Entre las principales desventajas están el hecho de ser sistemas de alta complejidad y costo que requieren experticia en ciencia de datos, infraestructura computacional y una gran cantidad de datos históricos de alta calidad para el entrenamiento. Constituyen una caja negra; por lo que puede ser difícil entender exactamente por qué el modelo tomó una decisión determinada, a esto se suma que precisan un mantenimiento frecuente, o sea el modelo precisa un reentrenamiento periódico si las condiciones de operación cambian significativamente.

Índice de estabilidad de arco basado en la impedancia

Blazic, Škrjanc y Logar en [7], plantean que las tensiones y corrientes de fase pueden ser empleados para determinar la estabilidad del arco, pues estas tienen una relación intrínseca con el comportamiento del arco en cada etapa de fusión. La impedancia de fase guarda relación con las tensiones y corrientes de fase como puede apreciarse en la ecuación(2), siendo válido el análisis de ésta para la obtención de un índice de estabilidad con el cual identificar los estados del proceso de acuerdo a su comportamiento. Si se observa y analiza la figura 1, correspondiente al proceso de fusión de una cesta, se puede ver claramente como a medida que avanza dicho proceso la amplitud de las curvas de impedancia de cada fase va disminuyendo, mostrando que éste se va tornando más estable.

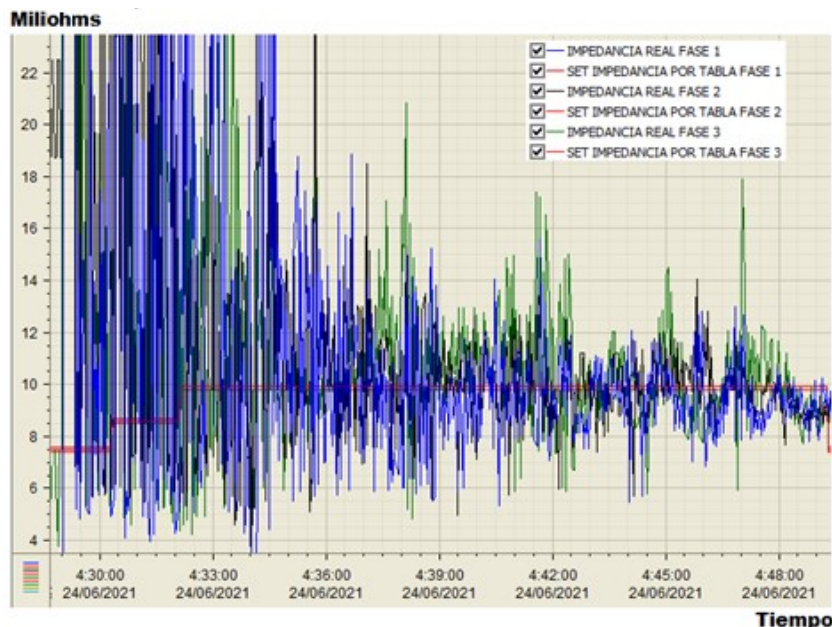


Fig. 1. Gráficos de impedancia de fase durante el desarrollo de la fusión de una cesta en el HAE de Acinox Las Tunas

En [16], se propone el control de impedancia para hornos de arco eléctrico de ultra alta potencia (UHP) con algoritmos inteligentes de posicionamiento de electrodos, donde el autor desarrolla un índice mediante el escalamiento no lineal de la impedancia a través de algoritmos genéticos y lógica borrosa. Aunque este enfoque para la obtención del índice es novedoso, tiene varias desventajas con respecto a propuestas anteriores: el uso de algoritmos genéticos implica una carga computacional considerable que puede dificultar su implementación en entornos industriales con controladores de bajo costo o capacidad limitada, el rendimiento del sistema depende de la calibración precisa de los parámetros para el escalamiento no lineal. El mismo constituye un ejemplo claro y con resultados apreciables de que esta variable se puede utilizar para juzgar si el arco es estable o no. Cabe destacar que, según la revisión bibliográfica realizada, la propuesta de índice de estabilidad de arco basado en la desviación estándar de la impedancia de fase que se presenta en este artículo no ha sido previamente abordada ni analizada en la literatura especializada, constituyendo una contribución original del presente trabajo. Su aplicación podría resultar beneficiosa y eficaz en el contexto operativo del HAE.

Para el cálculo de este índice se parte de obtener los valores RMS de las tensiones de fase empleando la ecuación (1):

$$V_i = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N V_i^2(k)}, i=R,S,T \quad (1)$$

Donde V_i representa las tensiones de fase correspondientes a las fases 'R', 'S', 'T' y N es la longitud de la ventana utilizada para el cálculo del valor RMS. De manera similar se obtiene el valor RMS de las corrientes de fase mientras la impedancia de fase resulta de la ecuación (2):

$$Z_i = V_i / I_i, i=R,S,T \quad (2)$$

Una vez que se obtienen los valores de la impedancia de fase Z_i a partir de los valores V_i y de las corrientes de fase I_i , el siguiente paso consiste en calcular la desviación estándar de estas mediciones respecto al valor de referencia (set point) de impedancia establecido para la regulación de los electrodos según la ecuación (3). Este enfoque presenta la doble ventaja de cuantificar tanto la estabilidad del arco eléctrico como la efectividad del sistema de control de los electrodos.

En los hornos donde se realiza el control por impedancia, el set point está disponible directamente. Para los sistemas que emplean control por corriente, este parámetro debe calcularse mediante el cociente entre la referencia de tensión y la referencia de corriente. La desviación estándar resultante constituye un indicador directo de la estabilidad del sistema: a mayor inestabilidad del arco, mayor dispersión en las mediciones de impedancia y, consecuentemente, mayor desviación estándar respecto al valor deseado.

$$Z_{index_i} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N (Z_{ij} - Z_{setpoint_i})^2}{N-1}}, i=R, S, T \text{ y } j=1, 2, 3, \dots, N \quad (3)$$

Donde Z_{index_i} representa las desviaciones estándar de fase y $Z_{setpoint_i}$ es el valor de la impedancia de fase deseada.

Estos valores permiten evaluar la estabilidad en cada fase, constituyéndose así en índices de estabilidad de fase. Adicionalmente, puede definirse un índice de estabilidad general del sistema a partir de los valores por fase. Dado que la inestabilidad en cualquier fase afecta globalmente al proceso, este índice se calcula como el valor máximo entre las desviaciones estándar de impedancia de todas las fases como se plantea en la ecuación (4), considerándose al sistema inestable cuando al menos una fase presenta esta condición:

$$Z_{index} = \max(Z_{index_i}), i=R, S, T \quad (4)$$

donde: Z_{index} representa el índice de estabilidad del arco general.

Integración del índice en la estrategia de control de electrodos

El índice de fase se calcula en tiempo real con ventanas deslizantes de 1 s ($N=60$ ciclos a 60 Hz). Se definen tres regiones operativas basadas en el valor normalizado $Z_i = Z_{index_i} / Z_{setpoint_i}$:

- Estable ($Z_i < 0.10$): se mantiene la consigna de impedancia actual.
- Inestabilidad moderada ($0.10 < Z_i < 0.25$): se aplica un ajuste fino de la posición del electrodo ($\pm 5\%$ de la carrera máxima) con paso de integración reducido.
- Inestabilidad severa ($Z_i \geq 0.25$): se ejecuta un retroceso rápido del electrodo (10-15% de la carrera) seguido de un reposicionamiento gradual a la consigna.

Esta lógica fue implementada en el PLC del HAE de Acinox Las Tunas y probada en simulación y en paradas técnicas con carga fría. Los resultados preliminares mostraron una reducción del 12% en el número de extinciones de arco por colada. Estos resultados son consistentes con implementaciones industriales recientes de control de electrodos basado en impedancia, que reportan mejoras similares en la estabilidad del arco [17].

Es importante destacar, que en el control de electrodos, las desviaciones sostenidas con respecto a la referencia no necesariamente generan arcos inestables (figura 2), sin embargo, al calcular el índice de estabilidad utilizando dicha referencia, los resultados reflejarán tanto el problema de control como posibles inestabilidades del arco según los rangos preestablecidos, incluso cuando estas últimas no existan realmente. Esta situación exigiría redefinir los umbrales del sistema empleado. Mientras persistan los errores en la regulación de electrodos, cualquier sistema basado en este índice diagnosticará falsas inestabilidades, comprometiendo su eficacia. Por tanto, se recomienda utilizar este índice, y todos aquellos que dependen de referencias de control, únicamente cuando se disponga de un sistema de control de los electrodos efectivo. Cuando no exista un controlador confiable para estos, la alternativa recomendada es calcular la desviación respecto al promedio, en lugar de usar la referencia. Este enfoque proporciona valores que reflejan el estado real del arco, aunque pierde la capacidad de diagnosticar problemas de malfuncionamiento del controlador. Como muestra la figura 2, puede existir buena estabilidad del arco a pesar de que la impedancia real supere consistentemente la referencia, situación característica de controladores proporcionales como el instalado en el HAE de Acinox Las Tunas.

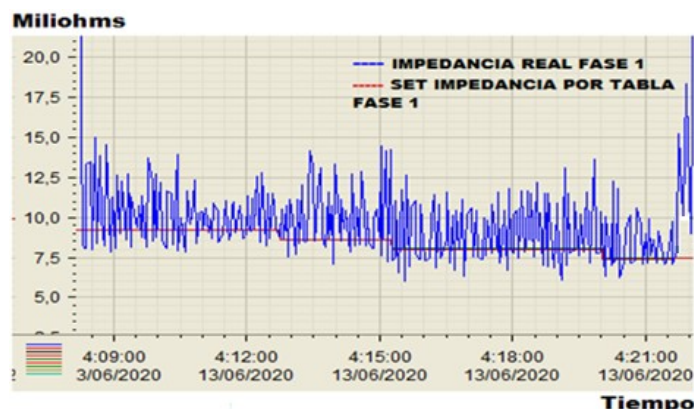


Fig. 2. Gráficos de la impedancia de la fase 1 durante el desarrollo de la fusión de una cesta en el HAE de Acinox Las Tunas

Dado que una fortaleza fundamental de este trabajo es evaluar la efectividad del control de los electrodos, se ha optado por emplear la referencia para el cálculo del índice de estabilidad.

Integración del índice en la estrategia de control de potencia

El índice general, definido como el máximo de los índices de fase, se utiliza para gestionar la transición entre las etapas del programa de fusión y para optimizar la entrega de potencia. Se definen cuatro etapas operativas (tabla 1):

Tabla 1. Etapas del proceso de fusión de acuerdo a valores del índice general

Etapa	Denominación	Rango de Z_{index} (normalizado)	Acción de control
1	Perforación	$Z_{index} > 0.30$	Potencia máxima (tap alto), se prioriza penetración
2	Fundición	$0.15 < Z_{index} \leq 0.30$	Potencia media, se monitorean no uniformidades
3	Baño plano	$0.08 < Z_{index} \leq 0.15$	Reducción progresiva de potencia, se prepara medición
4	Acero listo	$Z_{index} \leq 0.08$	Se recomienda medición de temperatura y posible fin de colada

La transición entre etapas se consolida solo después de que el índice permanezca en el nuevo rango durante al menos 10 s, evitando falsos cambios por fluctuaciones transitorias. Este enfoque, implementado en el sistema experto SACPOT-HAE [18], demostró en simulación un ahorro promedio de 1.67 MW por colada, equivalente a 400 MW mensuales, con un impacto económico estimado en 16.24 millones de pesos anuales. Resultados similares en la integración de índices de estabilidad en estrategias de control de potencia han sido reportados recientemente en la literatura, confirmando la aplicabilidad industrial de este tipo de indicadores [9]. También en Zhang et al, [19] se reportan ahorros muy cercanos respecto a la optimización de transferencia de calor y a la eficiencia energética que se estimaron en estas simulaciones. Es importante destacar que, mientras el control de electrodos utiliza el índice de fase para actuar sobre cada electrodo de forma independiente, el control de potencia emplea el índice general para decidir cuándo cambiar de tap y cuándo recomendar el fin del proceso. Esta arquitectura dual permite una optimización coordinada del horno.

RESULTADOS y DISCUSIÓN

Luego de realizar el cálculo del índice propuesto para diferentes coladas con el propósito de analizar su desempeño, en la figura 3, se muestra un ejemplo del resultado obtenido durante la fusión de una colada en el HAE de Acinox Las Tunas, donde se puede apreciar una evolución comparativa entre diferentes índices a lo largo del proceso de fusión.

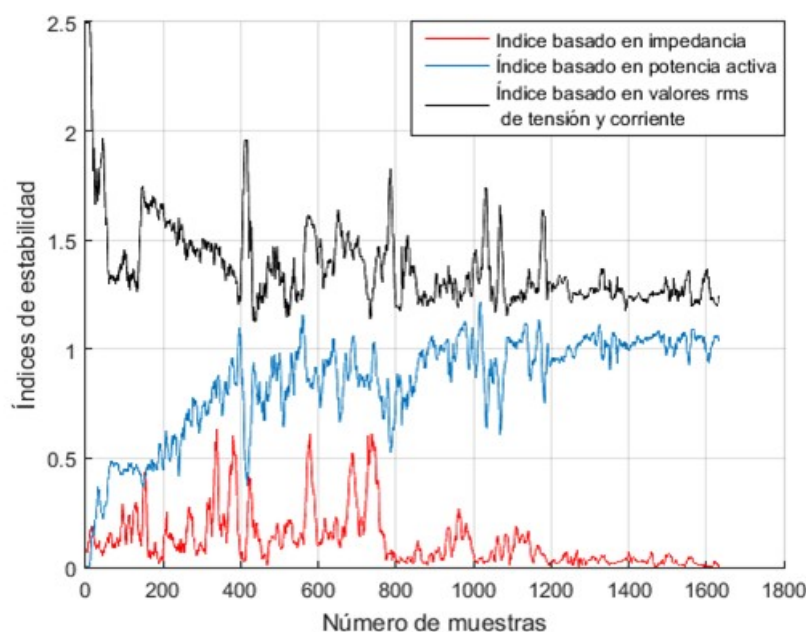


Fig. 3. Comparación de distintos índices de estabilidad del arco durante la fusión de una tercera cesta

Para cuantificar la concordancia entre índices, se calcularon los coeficientes de correlación de Spearman entre el índice propuesto y otros índices de referencia en 10 coladas diferentes registradas en el HAE de Acinox Las Tunas entre 2023 y 2025. Los resultados (tabla 2), muestran una correlación media de 0.86 ($p < 0.01$) con el índice basado en valores RMS de tensión y corriente, y 0.79 con el de potencia activa. Una prueba t de Student para muestras pareadas ($n = 10$ coladas) indicó que el índice propuesto detecta eventos transitorios de inestabilidad con un adelanto medio de 0.8 s respecto al índice de potencia ($p < 0.05$), y de 0.3 s respecto al índice de tensión y corriente ($p = 0.08$). Aunque la planta se encuentra actualmente fuera de operación por la crisis energética, los datos históricos fueron suficientes para validar estadísticamente el nuevo índice.

Tabla 2. Correlación y tiempos de detección del índice propuesto frente a otros índices de estabilidad

Índice de referencia	Coef. correlación Spearman	p-valor	Adelanto del índice propuesto (s)
RMS Tensión y Corriente	0.86 ± 0.07	<0.08	0.3 ± 0.2
Potencia activa	0.79 ± 0.09	<0.05	0.8 ± 0.3

Una característica fundamental compartida por el índice propuesto y el índice basado en los valores RMS de tensión y corrientes es la tendencia descendente de su amplitud a medida que avanza la fusión. Este fenómeno es coherente con lo que ocurre físicamente en el proceso: durante las fases iniciales (perforación y fusión temprana), el arco es inherentemente inestable, interactuando con chatarra de tamaño irregular y geometría cambiante, lo que genera una alta dispersión en la impedancia, así como de la tensión o la corriente. A medida que el baño de metal fundido se estabiliza, el arco encuentra un medio más homogéneo, reduciéndose las fluctuaciones y, consecuentemente, los valores de estos índices.

Por el contrario, el índice basado en la potencia activa de fase, exhibe una tendencia opuesta, incrementando su valor a lo largo del tiempo. Esta divergencia no indica una falta de efectividad, sino que pone de manifiesto la diferente naturaleza física que cada índice representa. Mientras que los índices descendentes miden fundamentalmente la estabilidad y regularidad del arco, el índice de potencia activa está más relacionado con la eficiencia de la transferencia de energía al baño metálico. En las fases finales, con un arco estable y una longitud de arco mejor controlada, la potencia transferida se maximiza, resultando en un valor de factor de potencia más alto. Esta complementariedad sugiere que el índice de potencia es un excelente indicador del desempeño energético global, mientras que el índice propuesto es un indicador más directo de la dinámica y estabilidad del arco eléctrico.

Los valores de cada índice en la figura 3, fueron normalizados para facilitar su visualización conjunta (cada índice dividido por su valor máximo en la colada), lo que no altera sus tendencias relativas ni sus capacidades de detección de eventos. Un ejemplo de la sincronía entre los índices puede apreciarse próximo a la muestra 400, donde un evento de inestabilidad transitoria, posiblemente causado por el colapso de una pieza de chatarra, genera un pico simultáneo en los índices de impedancia. En este caso en particular, se puede notar cómo el índice propuesto es capaz de reflejar cambios en su comportamiento antes que los otros índices, lo cual demuestra su capacidad para detectar perturbaciones rápidas en el proceso con una sensibilidad comparable e incluso superior a la de otros métodos más complejos. Al acercarse a la muestra número 800 se observa un caso similar.

La principal ventaja del índice propuesto reside en su balance único entre simplicidad y contenido informativo. A diferencia de otros índices su cálculo se realiza directamente en el dominio del tiempo a partir de valores RMS, implicando una menor carga computacional. Asimismo, frente a índices que, si bien son robustos, requieren de la instalación y mantenimiento de sensores especializados en un entorno hostil, dicho método se sustenta en mediciones eléctricas estándar, ya disponibles en cualquier sistema de control de HAE, esto lo convierte en un método de implementación directa. A diferencia de otros enfoques que, debido a la naturaleza de sus algoritmos de cálculo, requieren ventanas temporales significativas, esta propuesta permite detectar inestabilidades prácticamente en tiempo real.

Su respuesta anticipatoria sugiere una ventaja para aplicaciones de control en tiempo real, donde la pronta detección de inestabilidades es crítica. Una característica distintiva es su doble capacidad diagnóstica, no solo cuantifica la estabilidad del arco, sino que también refleja la efectividad del sistema de control de los electrodos al utilizar el setpoint de impedancia como referencia. Un valor de este índice persistentemente alto puede ser indicativo tanto de un proceso de fusión inestable como de un mal desempeño del controlador de electrodos, proporcionando así una herramienta de diagnóstico más completa para los ingenieros de proceso. Este aspecto es de suma importancia para estas instalaciones, lo que hace que este método sea aún más atractivo.

El índice general fue incorporado como variable principal en el sistema experto SACPOT-HAE. En las simulaciones realizadas con 20 coladas reales, el sistema recomendó cambios de tap y momentos de medición de temperatura que, según la validación de 13 expertos de la planta, habrían reducido el consumo energético promedio en 1.67 MW por colada. La capacidad del índice para detectar el momento óptimo de transición a la etapa de "acero listo" permitió disminuir las mediciones termométricas innecesarias en un 85 % de las coladas analizadas, con el consiguiente ahorro de tiempo y energía [18]. Estos resultados confirman que el índice propuesto no es solo un indicador de estabilidad, sino una herramienta práctica para la automatización avanzada del horno.

En conclusión, los resultados demuestran que el índice de estabilidad basado en la desviación estándar de la impedancia de fase:

- Corroborar la estabilización progresiva del arco durante la fusión, mostrando una tendencia coherente con otros métodos publicados.
- Proporciona una respuesta dinámica comparable para la detección de eventos transitorios de inestabilidad.
- Ofrece una implementación más directa y de menor costo computacional que otras alternativas.
- Aporta información valiosa adicional sobre el desempeño del sistema de control de los electrodos siempre y cuando el cálculo de la desviación estándar se realice con respecto al valor de referencia de impedancia.
- Puede ser una solución efectiva si se utiliza como variable de control en los sistemas de entrega de potencia al horno de arco eléctrico pudiendo garantizar una elevada eficiencia energética.

CONCLUSIONES

En la industria siderúrgica, resolver el problema del ahorro de energía en los HAE tiene una gran importancia. Un arco inestable es uno de los factores más significativos en el aumento del consumo de potencia, por consiguiente, si la información de condición del arco puede conocerse, la energía se usará de una manera mucho más eficaz. En este artículo se propone un nuevo método para la obtención de un índice de estabilidad del arco en un HAE, así como los índices de arco de fase mediante el análisis de una variable: la impedancia, que se utiliza comúnmente en los procesos de fusión de acero incluso para realizar el control de los electrodos. Una de las ventajas fundamentales de los índices que se proponen es que estos reflejan el desempeño del control de los electrodos y resultan ser precisos y económicos con respecto a otros ya existentes.

Los resultados de los ensayos en los que se compara el nuevo método con otros existentes muestran que éste es adecuado para determinar la estabilidad del arco. Las características funcionales y las ventajas operativas que ofrece esta propuesta la posicionan como una de las alternativas más convenientes y viables para su implementación en entornos industriales, especialmente en contextos donde se requiere optimizar el consumo energético y mejorar la productividad sin incurrir en altos costos de instrumentación o procesamiento de datos. La misma constituye una solución práctica, robusta y adaptable, con potencial para ser integrada en sistemas de control inteligentes y en estrategias de mantenimiento predictivo.

El índice de estabilidad propuesto ha demostrado ser una herramienta versátil que sirve tanto para el control de electrodos (mediante los índices de fase) como para el control de la potencia entregada al horno (mediante el índice general). Su integración en el sistema experto SACPOT-HAE permitió definir etapas operativas claras (perforación, fundición, baño plano, acero listo) con umbrales cuantificables, posibilitando transiciones automáticas del programa de fusión y una detección temprana del momento óptimo para la medición de temperatura. Esta arquitectura dual constituye una contribución original y práctica para la optimización energética de hornos de arco eléctrico en entornos industriales con recursos limitados.

REFERENCIAS

- [1] Lugo, N., *et al.* "The Effect of Arc Stability on EAF Performance,". in Proc. AISTech - Iron & Steel Technology Conference, Columbus, Ohio, USA, 2024. Disponible en: <https://www.proceedings.com/content/074/074798webtoc.pdf>
- [2] Jawahery, S., *et al.* "Thermophysical model for online optimization and control of the electric arc furnace,". Metals. 2021, vol. 11, n. 10, p. 1587. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2075-4701/11/10/1587>
- [3] Kim, K., *et al.* "Phase stability index of AC furnace arc based on RMS and THD,". en Proc. IEEE Int. Symp. Ind. Electron., Estambul, Turquía, 2014, p. 1715-1720. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6864772>
- [4] Nikolaev, A., *et al.* "Research of the Efficiency of Control Algorithms of Ladle Furnace Unit Using Information on Harmonic Composition of Arc Currents,". 2025 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), Sochi, Russian Federation, 2025, p. 1078-1083. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/11028356>
- [5] Tseng, K., *et al.* "An experimentally verified hybrid Cassie-Mayr electric arc model for power electronics simulations,". IEEE Trans. Power Electron. 1997, vol. 12, n. 3, p. 429-436. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/575670>
- [6] Król, S., *et al.* "Analysis of electrical arc furnace operation based on nonlinear modeling,". ISIJ Int. 2022, vol. 62, n. 5, p. 1045-1052. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/222371902_Improvement_of_electrical_arc_furnace_operation_with_an_appropriate_model
- [7] Blažič, A., *et al.* "Arc Quality Index Based on Three-Phase Cassie-Mayr Electric Arc Model of Electric Arc Furnace,". Metals. 2024, vol. 14, n. 3. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2075-4701/14/3/338>
- [8] Nikolaev, A. "Improving the efficiency of electric modes control systems of electric arc furnaces through the use of an adaptive impedance regulator,". Bull. South Ural State Univ. Ser. Power Eng. 2021, vol. 21, n. 4, p. 82–93. Disponible en: <https://cyberleninka.ru/article/n/povyshenie-effektivnosti-sistem-upravleniya-elektricheskimi-rezhimami-elektrodugovyh-pechey-za-schet-primeneniya-adaptivnogo>
- [9] Guerra, J., *et al.* "New arc stability index for industrial AC three-phase electric arc furnaces based on acoustic signals,". Sensors. 2020, vol. 20, n. 23, p. 6840. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/347770969_New_Arc_Stability_Index_for_Industrial_AC_Three-Phase_Electric_Arc_Furnaces_Based_on_Acoustic_Signals
- [10] Dehestani, A., y Alizadeh, M. "Identification of plasma arc model parameters in an electric arc furnace plant via measurement at the secondary side of the transformer,". J. Inst. Eng. (India): Series B. 2021, vol. 102, n. 5, p. 1079–1089.
- [11] Van, M., *et al.* "Development of an electric arc furnace simulation model using the effective equilibrium reaction zone (EERZ) approach,". JOM. 2022, vol. 74, n. 4, p. 1610–1620.
- [12] Severoglu, N., y Salor, Ö. "Statistical Models of EAF Harmonics Developed for Harmonic Estimation Directly From Waveform Samples Using Deep Learning Framework,". in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 57, no. 6, pp. 6730-6740, Nov.-Dec. 2021, doi: 10.1109/TIA.2021.3114127. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9543561>
- [13] L. D. Rippon, M. A. S. S. Choudhry y J. A. Wilson, "Representation learning and predictive classification: Application with an electric arc furnace," Computers & Chemical Engineering, vol. 150, art. no. 107304, 2021. doi: [10.1016/j.compchemeng.2021.107304](https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2021.107304).
- [14] M. Klimas and D. Grabowski, "Application of long short-term memory neural networks for electric arc furnace modeling," Appl. Soft Comput., vol. 145, p. 110574, Sep. 2023, doi: 10.1016/j.asoc.2023.110574. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1568494623005926>
- [15] T. C. Akinci, G. Gokmen, and A. A. Martinez-Morales, "A hybrid STFT-based machine learning framework for physically interpretable arc stability classification in electric arc welding systems," arXiv preprint, Apr. 2026, doi: 10.48550/arXiv.2604.17034. Disponible en: <https://arxiv.org/abs/2604.17034>
- [16] Y. C. Guk, S. Y. Chol y K. S. Il, "An impedance control approach of ultra high power electric arc furnace," arXiv, preprint arXiv:1702.08324, 2017. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/314092736_An_Impedance_control_approach_of_Ultra_High_Power_Electric_Arc_Furnace
- [17] A. A. Nikolaev y P. Tulupov, "Electric Arc Furnace Control System with Smelting Stage Diagnostic Function and Adaptive Non-Linear Impedance Controller," In 2021 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), pp.581-585, 2021, doi:10.1109/ICIEAM51226.2021.9446347. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/352338307_Electric_Arc_Furnace_Control_System_with_Smelting_Stage_Diagnostic_Function_and_Adaptive_Non-Linear_Impedance_Controller
- [18] Y. Albuérne, "Diseño de un sistema de ayuda para el control de potencia en el Horno de Arco Eléctrico de ACINOX Las Tunas," M.S. thesis, Fac. Ing. Eléctrica, Dept. Automática, Univ. Oriente, Santiago de Cuba, Cuba, 2022. Disponible en: <https://repositorio.uo.edu.cu/handle/123456789/1665?locale-attribute=en>

- [19] Y. Zhang, H. Li, and J. Wang, "The study of heat-mass transfer characteristics and optimization on electric arc furnace with the novel fence electrode," Appl. Energy, vol. 309, p. 118432, Mar. 2022, doi: 10.1016/j.apenergy.2022.118432. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261921016597>

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Yainier Albuérne Castro: <https://orcid.org/0009-0006-4778-0683>

Diseño de la investigación, recolección de los datos, implementación de los modelos, análisis de los resultados, elaboración del estado del arte, redacción del borrador del artículo, la revisión crítica de su contenido y en la aprobación final.

Mercedes Ramírez Mendoza: <https://orcid.org/0000-0001-8419-9608>

Diseño de la investigación, recolección de los datos, implementación de los modelos, análisis de los resultados, elaboración del estado del arte, redacción del borrador del artículo, la revisión crítica de su contenido y en la aprobación final.

Guillermo González Yero: <https://orcid.org/0000-0002-3300-1777>

Diseño de la investigación, recolección de los datos, implementación de los modelos, análisis de los resultados, elaboración del estado del arte, redacción del borrador del artículo, la revisión crítica de su contenido y en la aprobación final.

Felix Vladimir Roldán Jiménez: <https://orcid.org/0000-0002-3226-4014>

Diseño de la investigación, recolección de los datos, implementación de los modelos, análisis de los resultados, elaboración del estado del arte, redacción del borrador del artículo, la revisión crítica de su contenido y en la aprobación final.