



***Trabajo final presentado
en opción al Título de
Máster en Automática***

Autor: Ing. Yainier Albuerne Castro

Tutores: Dr. C. Guillermo González

Dr. C. Mercedes Ramírez Mendoza

Consultantes: MSc. Vladimir Morera Díaz

Ing. Benigno GarcíaPeña

Santiago de Cuba

2022



***Trabajo final presentado
en opción al Título de
Máster en Automática***

Título: Diseño de un sistema inteligente para el control de potencia en el Horno de Arco Eléctrico de ACINOX Las Tunas.

Autor: Ing. Yainier Albuerne Castro

Tutores: Dr. C. Guillermo González Yero

Dra. C. Mercedes Ramírez Mendoza

Consultantes: MSc. Vladimir Morera Díaz

Ing. Benigno García Peña

Pensamientos

Conseguir algo sin arriesgar nada, lograr experiencia sin ningún peligro u obtener una compensación económica sin trabajar es tan difícil como vivir sin haber nacido.

A. J. Gouthey

Dedicatoria

Dedico este trabajo a la persona a quien debo todo lo que soy: mi madre; pues sin su cariño, amor y entrega que no repara en sacrificios no hubiera sido posible el logro de esta y otras tantas metas.

Agradecimientos

Ha sido un camino largo y repleto de dificultades, sin embargo, no he andado solo. Me han acompañado en esta travesía los mejores integrantes de un equipo, personas que por su constancia, dedicación y amor contribuyeron en la realización de un sueño. Por lo tanto, doy fe de gratitud:

- ✓ A Idelsa Castro, mi querida madre, por ser excelente ejemplo de sacrificio y esfuerzo, por inspirarme a ser mejor y por dar todo de sí en pos de conseguir mis metas.*
- ✓ A mi esposa Ailé Paredes por toda la ayuda brindada.*
- ✓ Agradecimiento especial a mi tutora Mercedes Ramírez por su ayuda incondicional en la elaboración de este trabajo, por enseñarme todo lo que necesitaba aprender al respecto. Gracias por sus conocimientos brindados, su entrega y dedicación.*
- ✓ A mi tutor Guillermo González por sus consejos, apoyo, colaboración y sus valiosos aportes a este trabajo.*

A todos los que caminaron a mi lado a lo largo de esta etapa, quienes me hicieron mucho más fácil la vida y quienes sinceramente me hacen sentir afortunado por haber disfrutado de su compañía y porque me ayudan a seguir creyendo en un futuro mejor.

Resumen

En este trabajo de investigación se presenta un sistema inteligente para mejorar la tarea de los operadores de los hornos de arco eléctrico en aras de producir un impacto positivo en el sistema de control de potencia con que se cuenta actualmente.

El punto de partida es la necesidad de mejorar la eficiencia energética la cual se ve afectada por las distintas insuficiencias que se tienen con respecto al control de la potencia que se suministra al horno. Se hace revisión del empleo de los sistemas inteligentes en los hornos de arco eléctrico, fundamentalmente los sistemas expertos ya que estos últimos se han mostrado en la literatura particularmente ventajosos para el control de la potencia. Se da solución a problemas tales como el método para decidir el cambio de pasos del programa de perfil de fusión durante el desarrollo de las coladas, el diagnóstico de no uniformidades del arco eléctrico de las fases, así como la elección del mejor momento para medir la temperatura del baño de acero y la indicación de cuando finalizar la fusión.

La realización de este trabajo se centrará en los problemas de eficiencia energética provocados por las ineficiencias que posee el sistema de control de potencia con que se cuenta actualmente en el horno de Acinox Las Tunas y en el diseño de un sistema experto que permite utilizar una serie de herramientas que han sido integradas para ayudar al operador en su labor, que dispone de las soluciones para los diversos problemas existentes y que garantizará un incremento apreciable de la eficiencia energética.

Abstract

In this research work, an intelligent system is presented to improve the task of electric arc furnace operators in order to produce a positive impact on the current power control system.

The starting point is the need to improve energy efficiency, which is affected by the different insufficiencies that exist with respect to the control of the power supplied to the oven. A review is made of the use of intelligent systems in electric arc furnaces, fundamentally expert systems, since the latter have been shown in the literature to be particularly advantageous for power control. Solutions are given to problems such as the method to decide the change of steps of the fusion profile program during the development of the castings, the diagnosis of non-uniformities of the electric arc of the phases, as well as the choice of the best moment to measure the temperature of the steel bath and the indication of when to finish the fusion.

The realization of this work will focus on the energy efficiency problems caused by the inefficiencies of the power control system currently available in the Acinox Las Tunas furnace and on the design of an expert system that allows the use of a series of tools that have been integrated to help the operator in his work, that have solutions for the various existing problems and that will guarantee an appreciable increase in energy efficiency.

Índice

Introducción.....	1
Capítulo 1. Hornos de arco eléctrico: prácticas en el control de potencia.....	10
Introducción.....	10
1.1. El horno de arco eléctrico y su historia.....	10
1.2. Etapas de funcionamiento de un horno de arco eléctrico.....	13
1.3. Curvas de operación del horno de arco eléctrico.....	14
1.4. Perfiles de fusión.....	16
1.5. Control de potencia en hornos de arco eléctrico.....	18
1.5.1. Indicadores de arco y control dinámico de potencia.....	25
1.5.2. Sistemas de control de potencia modernos.....	27
1.6. La computación suave, los sistemas inteligentes y los HAE.....	31
1.6.1. Sistemas expertos.....	33
Conclusiones.....	38
Capítulo 2. SACPOT-HAE: herramienta para la optimización del régimen eléctrico de un HAE.....	40
Introducción.....	40
2.1. Generalidades del sistema propuesto.....	40
2.2. Diagnóstico de los estados del proceso de fusión del acero en un HAE.....	43
2.2.1. Algunos métodos existentes.....	43
2.2.2. Índice de estabilidad de arco basado en la impedancia.....	45
2.3. Sistema experto para el control de potencia en el HAE de Acinox Las Tunas.....	50
2.3.1. Sistema de detección de etapas del proceso de fusión en el HAE de Acinox Las Tunas.....	51
2.3.2. Programa eléctrico de fusión.....	53
2.3.3. Estabilidad de arco eléctrico de fase.....	55

2.3.4. Medición de temperatura y fin de fusión	57
2.4. Valoración de los resultados alcanzados.....	61
2.4.1. Análisis valorativo de los aspectos económicos y medioambientales.....	73
Conclusiones	73
Conclusiones.....	75
Recomendaciones	77
Bibliografía	78
Anexos	82
Programas de fusión preconcebidos para el SACPOT-HAE	82
Programación de función de cálculo de los índices de estabilidad de arco eléctrico de fase y del índice de estabilidad general en Matlab	85

INTRODUCCIÓN

Los hornos de arco eléctrico (HAE) desde sus inicios, han constituido una fuente constante de investigación científica multidisciplinaria, lo cual ha posibilitado que día a día se implementen mejoras en su funcionamiento, en las diferentes áreas tales como: el área productiva, el área energética, el área eléctrica, mecánica, química, etc. Todas estas investigaciones se han realizado con el propósito de construir hornos más eficientes y mejorar los costos de producción para lograr competir en un mercado internacional muy fuerte. Estos equipos han ido creciendo en capacidad instalada aumentando su participación en la producción mundial de acero hasta alcanzar niveles de un poco más de un tercio de la producción mundial. La Agencia Internacional de Energía ha elaborado pronósticos sobre la ruta de proceso y el consumo de metálicos hasta el año 2050, previendo una participación de las acerías eléctricas cercana al 50% [1]. Esto plantea un desafío al desarrollo de tecnologías en este campo, para aumentar la eficiencia energética del horno eléctrico, incrementar su productividad, disminuir su costo operativo y mejorar su *performance* ambiental.

En el marco energético de un país los hornos de arco son considerados como un consumidor energético de gran importancia, por el elevado uso de energía eléctrica que requieren para su operación. La energía eléctrica es el rubro más alto que una empresa debe pagar para fundir el acero, de ahí la necesidad de mejorar el control de ciertos parámetros que permiten definir la longitud de arco y la potencia del horno para operar en las áreas de mayor eficiencia energética.

El estudio de los niveles de intensidad, tensión, factor de potencia y potencias de un horno de arco eléctrico a través de las curvas de operación, permite obtener las condiciones óptimas de funcionamiento del horno [2], siendo estas:

- Máxima productividad (t o t/h): desde el punto de vista eléctrico el objetivo es transmitir la mayor potencia a una determinada carga metálica para obtener la productividad deseada [3].
- Máximo rendimiento (kWh/t): minimizar las pérdidas energéticas en relación con potencia consumida [4].

- Minimizar los costos de producción (\$/t): considerar el punto de operación óptimo del horno y no solo el ahorro energético sino también, el consumo de electrodos, consumo de refractarios, costos de energía química, costos de materia prima y la mano de obra [4].

Las curvas de operación permiten analizar los puntos en los cuales el funcionamiento del horno es más eficiente, además se puede determinar el área óptima de trabajo como punto de partida para implementar los perfiles de operación del horno, programas por los cuales se rigen los operadores o sistemas de control para regular la potencia que se entrega al horno.

Las prácticas operativas han ido evolucionando. Durante muchos años se definieron perfiles de potencia con arcos cortos y corrientes elevadas, buscando cubrir el arco en la escoria y reducir así el desgaste de los refractarios de las paredes laterales y la bóveda. Las mejoras tecnológicas han permitido utilizar mayores potencias, con arcos largos y menores corrientes, con las ventajas que ello reporta en cuanto a menor consumo de electrodos, mayor factor de potencia y potencia promedio de funcionamiento y en consecuencia se ha logrado mejorar la eficiencia eléctrica y térmica, y ha aumentado la productividad.

El programa eléctrico de fusión se establece con idea de optimizar la aportación de energía eléctrica en ese período y evitar los problemas derivados del ataque del arco al horno.

Cada perfil de fusión está formado por diferentes pasos, entendiéndose como tal los diferentes objetivos de tensión e intensidad secundaria que se deben ir cumpliendo durante el desarrollo de la colada, en estos se especifican los taps que se tienen que ir seleccionando en cada momento. Estos programas vienen definidos por el fabricante del sistema de regulación de electrodos, y le corresponde a cada acería ajustar y optimizar los programas en función de la práctica operacional y las características del horno. Una vez que se han estudiado y probado los distintos programas, normalmente se sigue la misma secuencia en cada colada, a no ser que ocurran *infundidos* en el horno por una chatarra más gruesa o con inertes, fugas en las pailas por rebotes del arco eléctrico, primeras coladas tras un período de

inactividad, etc., eventos que se deben considerar y para los cuales también se deben diseñar programas.

Los perfiles se ingresan para configurar el funcionamiento del horno interviniendo en cada una de las cargas de chatarra y en la etapa de afino.

En los primeros sistemas el operario podía actuar libremente sobre las tensiones secundarias y sobre los ajustes del sistema de control guiándose por estos programas. El siguiente paso fue el cambio automático y programado de las tomas del transformador controlando los perfiles de fusión *vía informática*.

A estos programas informáticos le siguieron unos sistemas de control por ordenador a los cuales se ha integrado todo lo relacionado con el proceso de fusión en sí. Llegan datos de la carga, de la temperatura de las paredes, del arco y, de acuerdo con un modelo metalúrgico de cada tipo de colada y otro modelo térmico de comportamiento del horno envía señales requeridas para la elección más adecuada de la potencia [5].

Una característica que tenían en común los sistemas anteriores era que el avance de la colada estaba relacionado con el consumo de energía eléctrica (kWh/t) en cada uno de los pasos definidos en el perfil de fusión. Para la optimización y control de los procesos siempre es más conveniente definir indicadores de funcionamiento que sirvan como variables de proceso en tiempo *real*. Es obvio que los HAE consumen un monto considerable de energía eléctrica por lo que es urgente la optimización de este proceso de fusión, lo que hará posible la reducción del consumo de potencia y los ciclos de tiempo de cambio de tap a tap. La retroalimentación de los sistemas de control de potencia es una de las vías para resolver este problema [6-8].

En [9, 10] se establece la conveniencia de utilizar indicadores de estabilidad y de cobertura de arco como variables de proceso en los sistemas de control de la potencia de los HAE empleándolos para la determinación del momento idóneo para el cambio de pasos, de acuerdo a la etapa y condiciones del proceso de fusión.

En la actualidad los sistemas de control de la transferencia de energía eléctrica en los hornos de arco eléctrico forman parte de sistemas de automatización más complejos que engloban además el control de electrodos, la transferencia de energía química, sistemas que controlan y monitorean prácticamente todo el proceso en sí,

sistemas que continúan evolucionando constantemente a medida que se desarrollan las tecnologías necesarias para este fin. A pesar de que la mayoría de los modernos sistemas no realizan un control dinámico regido por variables de proceso como indicadores de estabilidad y de cobertura de arco, índices de estabilidad de fase [11], el flujo total de calor radioactivo en los paneles del horno y otros nuevos conceptos y métodos que están dando buenos resultados en la optimización del proceso en los hornos de arco eléctrico si son cada vez más los investigadores que llaman al uso de estas variables e incluso existen sistemas que han puesto en práctica estas novedosas ideas.

El campo de la automatización para los sistemas del perfil de potencia en hornos de arco eléctrico es propio de países desarrollados. Los fabricantes europeos desarrollan todos los sistemas de control de potencia modernos [12]. Entre las principales compañías internacionales que producen la mayor parte de las tecnologías modernas para este propósito están Siemens VAI [13] y Danieli [14], sus *desarrollos* son significativos, pero no todos los fabricantes de acero *por la vía* de los HAE pueden contar con estas tecnologías. En Cuba no existen empresas de este tipo, ni existió antes del 2019 algún grupo o proyecto de investigación con tales propósitos.

Con la introducción de técnicas de inteligencia artificial (IA) en el control y automatización de procesos se ha producido una pequeña revolución: presentándose nuevas vías de solución a problemas tradicionales de control y supervisión, causados por la carencia de conocimiento preciso del sistema. Así es como nace el control inteligente de procesos, una disciplina en la que los métodos de control se desarrollan para emular algunas características importantes del ser humano, como la adaptación, el aprendizaje, el planeamiento bajo gran incertidumbre y el trabajo con gran cantidad de *datos*.

Como ejemplos de estudios y desarrollos de IA en el campo de la optimización de los HAE para lograr mayor eficiencia energética podemos citar: el trabajo de Czapla con algoritmos genéticos [15], Ghiormez [16] donde se aplica lógica difusa al control de dichos hornos, utilizando el mismo método primario para el control con el que funciona el sistema de regulación de electrodos E.M.P.E.R.E (Equipment for the

Measurement of Electrical Parameters and Regulation of Electrodes por sus siglas en inglés) [17], el uso de redes neuronales artificiales por Gajić [18] y por Raisz [19], este último propone un interesante método con el cual consigue distinguir los distintos estados operacionales de un horno, Lozynskyi [20] emplea un sistema experto para la detección de estos estados lo cual usa como base para escoger el momento adecuado para realizar los cambios de potencia en un HAE. En la última década el diagnóstico de los estados o etapas del proceso de fusión ha ganado importancia debido a las ventajas que supone su diagnóstico fundamentalmente en el área de la transmisión de potencia eléctrica al HAE y para obtener los mejores resultados posibles en su identificación se deben aplicar técnicas acordes con las condiciones del caso que se estudie pues no en todos los hornos se cuenta con suficientes datos como para aplicar una red neuronal artificial o no se han alcanzado suficientes conocimientos que permitan el desarrollo de un SE.

Los sistemas expertos (SE) son programas que imitan el comportamiento de un humano utilizando la información que el usuario le proporciona para darle una opinión sobre cierta materia. Una de sus ventajas es su capacidad de trabajar con grandes cantidades de información, que es uno de los problemas a los que se enfrenta el ser humano; el sistema experto, gracias a su velocidad de procesamiento, analiza todos los datos para aportar una decisión sólida.

Mientras que un experto humano tiene limitaciones y percances propios de su condición humana, es decir: se enferma, envejece, migra a otras empresas, el sistema experto, respecto a sus pares humanos, no sufre de estas cuestiones y se convierte en una herramienta estable para su entorno y fiable porque sus actividades son completamente replicables. Debido a la escasez de expertos humanos en determinadas áreas, los SE pueden almacenar su conocimiento para cuando sea necesario poder aplicarlo. Así mismo los SE pueden ser utilizados por personas no especializadas para resolver problemas. Además, si una persona utiliza con frecuencia un SE aprenderá de él. Finalmente, si se evalúa el costo total del empleo de esta tecnología, la replicabilidad y estabilidad, asociado a la seguridad que provee, resulta una ecuación favorable, aun considerando que las inversiones iniciales pueden ser relativamente elevadas [21].

La idea que se persigue cuando se construye un sistema experto es la de automatizar la labor del experto, partiendo en ocasiones de información insuficiente o incompleta. Teniendo esto en cuenta, se puede pensar que un sistema experto no es un sistema pensado para reemplazar al experto humano sino para *ayudarlo en la toma de decisiones* y además supone una descarga del experto del trabajo rutinario y, por lo tanto, la reducción de sus problemas. Son varios los SE que se han desarrollado para lograr un flujo óptimo de energía y un buen control de los perfiles de tensión en los sistemas eléctricos de potencia: Bansilal [22] plantea el empleo de un SE para el alivio de sobrecargas en la redes eléctricas, en el año 2002 Pimpa [23] defiende un sistema SCADA basado en sistemas expertos para el control de tensión en sistemas de potencia, 5 años después Azmy [24] propone uno sistema de estos para el manejo de perfiles de tensión en redes de interconexión, en el 2013 Vaschetti [25] se refiere al control secundario de tensión basado en sistemas expertos y presenta el diseño de un SE para el perfil de tensión en un sistema eléctrico de potencia. Teniendo en cuenta los buenos resultados que se han obtenido con el uso de los SE en los sistemas eléctricos de potencia resulta una alternativa muy atractiva para el control de la transferencia de potencia en un HAE, el cual posibilitaría obtener respuestas sobre los estados del proceso en el horno mediante el empleo de variables que denoten el comportamiento del sistema en tiempo real.

La industria metalúrgica cubana, con un historial de más de 40 años en la producción de aceros al carbono y en la fundición de piezas de aceros aleados e inoxidables cuenta con dos hornos de arco eléctrico repartidos en las empresas Antillana de acero y Acinox Las Tunas. Dichos hornos *se conectan* al sistema eléctrico nacional y son considerados grandes consumidores, existiendo una responsabilidad energética por parte de estas empresas en implementar mejoras en los procesos de fusión y reducir los costos de producción para que los productos tengan mayor competitividad en cuanto a precios y calidad en el mercado nacional e internacional.

El horno que se encuentra ubicado en la empresa *Acinox Las Tunas*, con una capacidad máxima de 60 t, cuenta con un sistema de control de potencia semiautomático, es el operador el que decide y escoge la potencia que se entrega al proceso, siguiendo un perfil de potencia establecido *en base a la experiencia* [26] y

limitado por ciertas normas impuestas por la empresa eléctrica [27]. Para la correcta aplicación del programa de fusión y para realizar una toma de decisiones más acertada el operador debe tener cierta experiencia sobre el proceso la cual no se adquiere en poco tiempo. El programa de fusión con que se cuenta no dicta claramente el orden de cambios de potencia que se debe ir ejecutando durante el proceso ni indica cual es el momento indicado para realizar cada cambio, el operador decide el nivel de potencia a aplicar y realiza estos cambios de acuerdo a sus conocimientos e interpretación de lo que sucede en el proceso basándose en el sonido o las vibraciones que se emiten desde el horno o el comportamiento de algunos parámetros eléctricos que se visualizan en el scada. Este modo de trabajo es *funcional*, lo cual quiere decir que es suficiente para garantizar la fundición de acero, no obstante tiene el inconveniente de que no todos los operadores interpretan del mismo modo lo que sucede en el proceso y por tanto no siempre ejecutan un procedimiento adecuado para cada colada, lo que ocasiona que la eficiencia energética en cada turno de trabajo no sea la misma ni la óptima (*ver tabla 1.2*), por lo general aquellos turnos que cuentan con operadores y fundidores más experimentados suelen tener los mejores resultados.

En [28] Saboohi plantea que sabiendo que el control de *HAE* típicos se realiza utilizando perfiles de fusión predefinidos y de acuerdo con la experiencia del operador, es evidente que dicha operación es subóptima, por lo tanto *el uso de un marco de optimización basado en modelos paralelos definitivamente puede mejorar los indicadores de desempeño del HAE*.

En base a lo antes expuesto, para la realización de este trabajo se plantea como **problema de la investigación** las insuficiencias que se presentan en el sistema de transferencia de potencia eléctrica en el horno de arco eléctrico de Acinox Las Tunas con relación a su control dinámico lo que afecta la eficiencia energética. Por ello se define como **objeto de la investigación** los sistemas de control de potencia en los hornos de arco eléctrico.

El **objetivo** consiste en diseñar un sistema experto que sirva de apoyo en la toma de decisiones del operador para el control de potencia en el horno de arco eléctrico de ACINOX Las Tunas.

Es por esto que el **campo de acción** es el sistema de control de potencia en el HAE de Acinox Las Tunas, planteándose como **hipótesis** que si se desarrolla un sistema experto que sirva de apoyo en la toma de decisiones del operador para el control de potencia en el horno de arco eléctrico de ACINOX Las Tunas se podrá mejorar la transferencia de potencia y por ende se incrementaría la eficiencia eléctrica.

Para el cumplimiento del objetivo propuesto se han asumido las siguientes tareas de investigación:

- I. Caracterizar desde el punto de vista gnoseológico, histórico y en la actualidad los hornos de arco eléctrico.
- II. Caracterizar los sistemas de control de potencia en hornos de arco eléctrico. Diagnosticar y fundamentar los problemas e insuficiencias referidas a los mismos y en particular en el de Acinox Las Tunas.
- III. Estudio bibliográfico de los sistemas expertos y las posibilidades que brinda el empleo de estos en aplicaciones de control de potencia.
- IV. Desarrollar un sistema experto para el apoyo en la toma de decisiones del control de potencia en el horno de arco eléctrico de ACINOX Las Tunas.
- V. Validación del sistema propuesto.

Métodos y técnicas empleados en la investigación:

1. Análisis de fuentes documentales.
2. Técnicas y métodos empíricos: Observación, encuesta y entrevista.
3. Método histórico lógico.
4. Método de análisis y síntesis.
5. Métodos experimentales: Programación.

Significación Práctica:

La investigación ofrece al sector industrial metalúrgico una herramienta computacional *abierto a nuevos códigos*, que brinda ayuda en la toma de decisiones para lograr un control dinámico de la transferencia de potencia en los hornos de arco eléctrico teniendo en cuenta las características fundamentales del proceso de fusión

y los conocimientos de expertos en la operación de estas importantes máquinas de hacer acero.

Es prueba fehaciente de las ventajas que tiene la cooperación entre las universidades y el potencial de las industrias químico-tecnológicas. En el ámbito del Departamento de Ingeniería en Automática constituye un mayor desarrollo en el área de los sistemas expertos y el control inteligente de procesos.

La presente investigación se encuentra organizada de la siguiente forma: una introducción general en la que se exponen las principales motivaciones que llevaron a la realización de esta investigación y en la cual se encuentra, además, la fundamentación del diseño metodológico de la misma.

Dos capítulos que constan de una introducción parcial para la mejor comprensión de los objetivos de los mismos, estos a su vez, se encuentran organizados por epígrafes, de manera que resulte más fácil su revisión por parte del lector. Finalmente, cada capítulo presenta sus conclusiones, además de las conclusiones generales, recomendaciones y bibliografía.

En el Capítulo I se presenta el estudio teórico del presente trabajo de investigación. Para ello se exponen las generalidades de la operación de los hornos de arco eléctrico y las características de los sistemas de control de la transferencia de potencia, así como las ventajas que reporta el uso de los sistemas inteligentes en el control de procesos complejos.

En el Capítulo II se exponen las características específicas del sistema desarrollado, las ventajas que ofrece y los algoritmos computacionales empleados.

Capítulo 1. HORNOS DE ARCO ELÉCTRICO: PRÁCTICAS EN EL CONTROL DE POTENCIA.

INTRODUCCIÓN

Actualmente existen cada vez más instrumentos y técnicas para monitorear y controlar la operación de un horno de arco eléctrico, pero para aprovechar esa gran cantidad de información y no correr el riesgo de implementar prácticas erróneas es necesario entender el funcionamiento del mismo. En este capítulo son destacados algunos conceptos básicos de la operación de los hornos de arco eléctrico y algunas prácticas que se han desarrollado para el control de la transferencia de potencia mediante los perfiles de fusión incluyendo las que se realizan en el horno de Acinox Las Tunas. También se hace referencia a los sistemas inteligentes y los beneficios que reporta su empleo para el desarrollo y optimización de los procesos en los HAE.

1.1. EL HORNO DE ARCO ELÉCTRICO Y SU HISTORIA

El horno de arco eléctrico tiene más de 100 años de existencia. Con el decurso del tiempo se han efectuado grandes desarrollos que han permitido el crecimiento continuo de las mini-acerías eléctricas en respuesta a los requerimientos de los acereros.

En 1800 se hizo saltar el primer arco entre dos electrodos de carbono alimentado por pilas de Volta gracias al inglés Sir Humphry Davy; el método de soldadura por arco eléctrico fue investigado por Pepys en 1815; Pinchon intentó crear un horno electrotérmico en 1853; y en 1878-79, Sir Wilhelm Siemens patentó el horno de arco eléctrico.

No sería hasta 1886 cuando el francés Paúl Heroult comenzó sus investigaciones para sintetizar la base tecnológica del horno de arco actual. Sus estudios llegaron a la cima cuando en 1902 realizó la primera fusión industrial sobre una cuba rectangular de 2 t alimentada por un transformador monofásico de 300 kVA. El proceso de fundido tuvo una duración de 10 horas.

La primera guerra mundial causó una rápida expansión en la capacidad de los hornos de arco eléctrico. En 1920, se produjeron 515 000 t de acero. El siguiente

crecimiento dramático ocurrió durante la segunda guerra mundial y en el año de 1945 se produjeron 3.153.000 t de acero vía hornos de arco, representando el 4,3 % del acero total.

En la década de los 70 se desarrollaron los hornos de ultra alta potencia o UHP (500 kVA/t), apareciendo los paneles enfriados por agua, en 1975. La utilización de energía suplementaria, operación con arco largo/escoria espumosa, transformadores de alta potencia, con alta tensión secundaria y reactor suplementario, hicieron posible llegar a potencias específicas de 700 a 1000 kVA/t.

La evolución del horno de arco eléctrico se resume en los siguientes hechos fundamentales: el tiempo de colada y el consumo específico de electrodos se han reducido en cuatro veces, y la energía eléctrica (kWh/t) a la mitad. En la figura 1.1 se muestra la evolución de los hornos de arco de fusión de acero a partir de 1950. En esta se observa cómo el tiempo de fusión pasó de 2,5 horas a menos de una hora, mientras que la velocidad de fusión pasó de 15 t/h a 90-95 t/h. Es conveniente indicar que esta variación en tiempos y velocidades se mantiene en la actualidad.

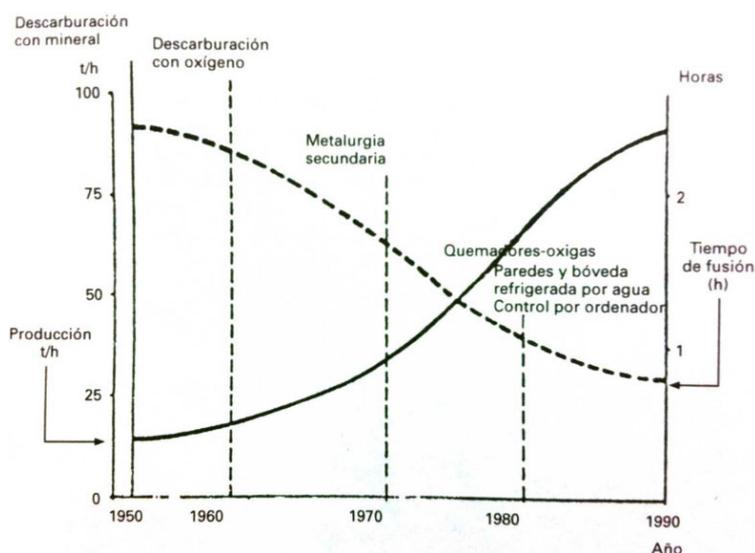


Figura 1.1. Evolución del horno de arco de corriente alterna [29].

Las grandes potencias eléctricas con que trabajan estos hornos, han contribuido mucho al desarrollo de los componentes eléctricos a usar. Una desventaja de su uso en la industria es la generación de armónicos y flicker en las redes de distribución

eléctrica, pero para tales efectos se han desarrollado tecnologías que ayudan a disminuir los impactos de estos disturbios.

En forma general, existen dos tipos de hornos: los de corriente alterna y los de corriente directa, estos últimos se distinguen de los primeros por incluir convertidores CA-CD. Para el funcionamiento de los primeros, la energía eléctrica proviene de una red trifásica en alta tensión, ingresa a una subestación y mediante un circuito eléctrico de potencia llega a los electrodos. El circuito consta de una línea de entrada desde la subestación hacia un transformador principal el cual se encarga de reducir la tensión de entrada en una tensión de salida determinada la cual se ajusta mediante un selector mecánico denominado *tap*, que se encarga de seleccionar un número determinado de espiras del devanado secundario. Consta además de un sistema de control comandado por un PLC para el movimiento de los electrodos, como se aprecia en la figura 1.2. El sistema de control regula la corriente eléctrica en cada fase en el momento en que la punta del electrodo entra en contacto con la carga metálica, el control se ejecuta actuando directamente sobre tres válvulas proporcionales que permiten el accionamiento de tres cilindros hidráulicos para controlar la longitud de arco siendo esta la distancia entre la punta del electrodo y la carga metálica.

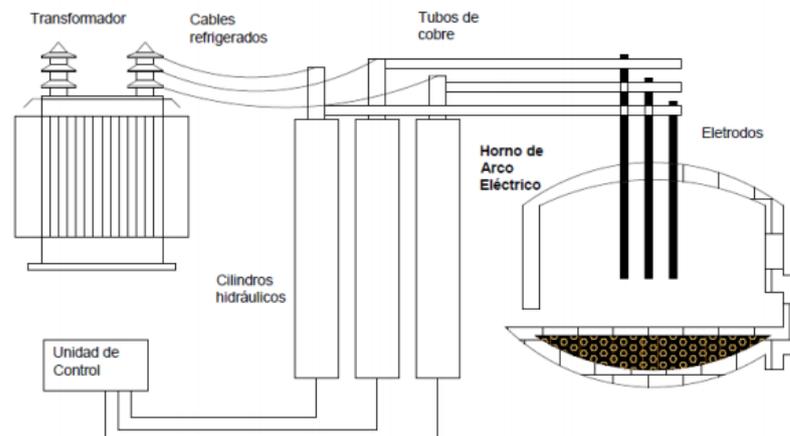


Figura 1.2. Esquema eléctrico del horno de arco eléctrico [30].

Existen variaciones en el diseño de un horno de arco eléctrico, dependiendo del producto final que se requiere y las condiciones del lugar donde este será usado.

En su más de un siglo de existencia, los hornos eléctricos de arco han evolucionado radicalmente, tanto en los aspectos tecnológicos como en la función que cumplen y los tipos de acero que producen. Actualmente estos hornos son poderosas máquinas de reciclar acero que hacen la tercera parte de la producción mundial, con una menor emisión de gases de efecto invernadero con respecto a la ruta basada en altos hornos y acería al oxígeno. La Agencia Internacional de Energía elaboró pronósticos sobre la ruta de proceso y el consumo de metálicos hasta el año 2050, previendo una participación de las acerías eléctricas cercana al 50% [1]. Esto plantea un desafío al desarrollo de tecnologías en este campo, para aumentar la eficiencia energética del horno eléctrico, incrementar su productividad, disminuir su costo operativo y mejorar su *performance* ambiental.

1.2. ETAPAS DE FUNCIONAMIENTO DE UN HORNO DE ARCO ELÉCTRICO

De manera general un horno de arco eléctrico presenta varios estados de funcionamiento que están bien definidos. El proceso se inicia con la carga del horno, formada por las chatarras (conjunto de piezas, partes metálicas, etc., de acero, inservibles y sin ninguna otra utilidad) y los aditivos formadores de escoria (principalmente la cal). Normalmente se cargan dos o tres cestas de chatarra por colada, en función de la densidad de la chatarra utilizada y el volumen del horno.

Durante el precalentamiento tiene lugar la combustión del gas natural para elevar la temperatura del acero, tras lo cual, se bajan los electrodos del horno y se conecta la alimentación para fundir los materiales cargados. Inicialmente el arco funde la chatarra lo cual se conoce como proceso de “perforación”. En esta etapa el arco presenta una característica marcadamente irregular debida fundamentalmente al movimiento de la chatarra que hace variar en amplio margen la longitud de la descarga y con ella la tensión de arco, llegando incluso a la extinción del arco cuando existe contacto directo entre alguno de los electrodos y el material; en este punto la tensión de arco se hace igual a cero.

El proceso continúa con un período intermedio donde el acero está parcialmente fundido. En este punto el arco alcanza una longitud más regular que en el período anterior, pero todavía se presentan algunas variaciones importantes. En esta etapa también se usan la inyección de oxígeno y los quemadores auxiliares para acelerar la

fusión, así como para ayudar a fundir la chatarra situada en los puntos fríos, con el propósito de lograr una fusión más uniforme.

La última etapa del proceso se denomina “baño plano”. Durante esta etapa, el acero se encuentra totalmente fundido, presentando una superficie regular que da lugar a un arco de longitud prácticamente constante, el cual presenta únicamente las fluctuaciones características de las descargas a través del aire.

Estas variaciones en el comportamiento del arco hacen que las corrientes presenten diferentes fluctuaciones para cada etapa del proceso de fundición.

Cuando la carga se ha fundido y el acero se encuentra en estado líquido, la inyección de oxígeno en el acero favorece la oxidación (cuyas reacciones también sirven como fuente de energía) y permite eliminar o reducir al máximo los elementos indeseables del baño (silicio, manganeso, fósforo, etc.), formando óxidos que pasan a la escoria y quemando el carbono que se elimina de forma gaseosa (CO y CO₂).

Tras el aporte de una cierta cantidad de energía, se miden la temperatura del baño y la composición química, para determinar si es necesario, o no, realizar algún otro tipo de adición para alcanzar las especificaciones finales deseadas. Una vez obtenidos la composición química y temperatura finales, se vuelca el contenido del horno en una cuchara para transportar el acero a la siguiente operación.

1.3. CURVAS DE OPERACIÓN DEL HORNO DE ARCO ELÉCTRICO

La necesidad de mejorar el control de ciertos parámetros que permiten definir la longitud de arco y la potencia del horno es muy importante para operar en las áreas de mayor eficiencia. El estudio de los niveles de intensidad, tensión, factor de potencia y potencias de un horno de arco eléctrico en las curvas de operación (ver figura 1.8), permite obtener las condiciones óptimas de funcionamiento del horno [2], siendo estas:

- Máxima productividad (t o t/h): desde el punto de vista eléctrico el objetivo es transmitir la mayor potencia a una determinada carga metálica para obtener la productividad deseada [3].
- Máximo rendimiento (kWh/t): minimizar las pérdidas energéticas en relación con la potencia consumida [4].

- Minimizar los costos de producción (\$/t): considerar el punto de operación óptimo del horno y no solo el ahorro energético sino también, el consumo de electrodos, consumo de refractarios, costos de energía química, costos de materia prima y la mano de obra [4].

Las curvas de operación permiten analizar los puntos en los cuales el funcionamiento del horno es más eficiente, además se puede determinar el área óptima de trabajo como punto de partida para implementar los perfiles de operación del horno, programas por los cuales se rigen los operadores o sistemas de control para regular la potencia que se entrega al horno.

Cada valor del *cambiador de tap* (del inglés tap changer) en el transformador equivale un valor de tensión en el secundario esto permite generar diferentes curvas de operación. En la figura 1.5, se representan las curvas de potencias, longitud de arco, factor de potencia, estas curvas fueron obtenidas luego de realizar las operaciones matemáticas correspondientes [31] para cada tap, luego se realiza el análisis de acuerdo a los siguientes pasos:

- El punto de inflexión P1 es representado al considerar las siguientes curvas: el factor de potencia f_p , la potencia activa P, la potencia reactiva Q, y la potencia aparente S, dicho punto indica la máxima corriente de operación I_{op} que el sistema del horno permite funcionando de manera eficiente para obtener la máxima potencia activa, considerando que hacia el lado derecho del punto P1 a pequeños incrementos de potencia activa P le corresponden grandes incrementos de corriente por lo tanto aumentan las pérdidas eléctricas y se sobrecarga el transformador, siendo recomendable trabajar hacia la izquierda del punto en cuestión.

- El punto P2 indica la corriente nominal máxima del transformador a carga nominal.

- Para determinar el punto óptimo de operación del horno se debe considerar otros aspectos adicionales a los eléctricos como: la densidad de la chatarra, el índice de erosión del refractario, el consumo de electrodo y el tiempo de operación o de no operación, estos últimos más conocidos comúnmente como power on y power off respectivamente. Para este caso, desde el punto de vista eléctrico, dentro del área 3 denotada como A3, se encuentra la zona de trabajo más eficiente del horno, comprendida entre un factor de potencia no mayor de 0,9 ni menor de 0,77. Para los

diferentes taps del transformador, en esta zona de operación, se pueden lograr opciones de funcionamiento más adecuadas para el horno, obteniendo un menor consumo de energía por tonelada producida.

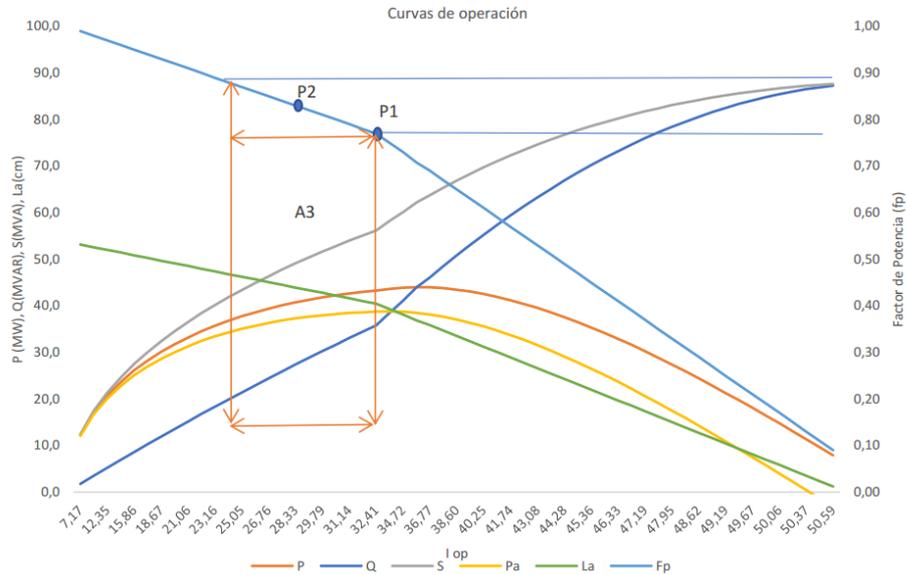


Figura 1.5. Curvas de operación de hornos de arco eléctrico [31].

1.4. PERFILES DE FUSIÓN

La energía eléctrica es el principal insumo energético de los HAE, por lo tanto, el control de los parámetros eléctricos que definen la longitud del arco y el nivel de potencia del horno es muy crítico para una operación eficiente, sin embargo, para establecer esos niveles de operación se tienen que considerar las condiciones del proceso.

Las prácticas operativas han ido evolucionando. Durante muchos años se definieron perfiles de potencia con arcos cortos y corrientes elevadas, buscando cubrir el arco con la escoria y reducir así el desgaste de los refractarios de las paredes laterales y de la bóveda. Las mejoras tecnológicas han permitido utilizar mayores potencias, con arcos largos y menores corrientes, con las ventajas que ello reporta en cuanto a menor consumo de electrodos, mayor factor de potencia y potencia promedio de funcionamiento y en consecuencia mejores eficiencias eléctrica y térmica, y aumento en la productividad.

El programa eléctrico de fusión se establece con la idea de optimizar la aportación de energía eléctrica en ese período y evitar los problemas derivados del ataque del arco al horno. Esto se hace teniendo en cuenta lo visto en epígrafes anteriores con lo que se concluye que:

- En los momentos iniciales, al estar fría la chatarra y estar llena toda la cuba del horno, si se iniciase la fusión con una tensión elevada y un arco largo, el arco eléctrico sería inestable. Además, al ser el arco largo y no estar los electrodos introducidos en la chatarra, la bóveda soportaría una radiación importante. Por todo ello, la fusión se inicia con una tensión no muy alta y con arco corto.
- En el período inicial de la fusión los electrodos deben haber abierto un agujero central en la carga y sus puntas deben estar rodeadas de chatarra, por lo que la bóveda y las paredes se encuentran protegidas de la radiación del arco. En estas condiciones se pueden emplear altas tensiones y arco largo para aportar altas potencias y fundir rápidamente. La utilización de un arco largo da lugar a la creación de un cráter mayor alrededor de los electrodos, por lo que se facilita una fusión más rápida y homogénea, al mismo tiempo que se disminuye el riesgo de rotura de los electrodos por la caída de chatarra.
- En ocasiones, cuando la chatarra va fundiéndose y descendiendo, se desprotege la cuba del horno, por lo que conviene bajar la potencia eléctrica, pasando a tensiones más bajas y a un arco más corto. Esto también es válido para cuando el nivel de la escoria baja.

Cada perfil de fusión está formado por diferentes pasos, entendiéndose como tal los diferentes objetivos de tensión e intensidad *secundaria* que se deben ir cumpliendo durante el desarrollo de la colada, en estos se especifican los taps que se tienen que ir seleccionando en cada momento. Estos programas vienen definidos por el fabricante del sistema de regulación de electrodos, y le corresponde a cada acería ajustar y optimizar los programas en función de la práctica operacional y las características del horno. Una vez que se han estudiado y probado los distintos programas, normalmente se sigue la misma secuencia en cada colada, a no ser que se den infundidos en el horno por una chatarra más gruesa o con elementos *inertes*, fugas en las pailas por rebotes del arco eléctrico, primeras coladas tras un período

de inactividad, etc., eventos que se deben considerar y para los cuales también se deben diseñar programas.

Los perfiles se ingresan para configurar el funcionamiento de operación del horno interviniendo en cada una de las cargas de chatarra y en la etapa de afino. Los parámetros que constituyen los perfiles de funcionamiento eléctrico pueden ser modificados para mejorar la eficiencia del horno siendo estos los que se aprecian en la tabla 1.1.

- El número de tap del transformador.
- La curva de corriente (valor nominal de corriente con el que trabajará el transformador)
- El tipo de sistema de regulación si es por Impedancia (Z) o por corriente (I), de esta elección dependerá la referencia para la regulación de los electrodos.

Tabla 1.1: Ejemplo de perfil de funcionamiento de un horno de arco [31].

Carga #1										
# Pasos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Energía específica [kWh/t]	25	50	80	120	140	160	180	220	250	280
Tap [#]	1	3	4	5	5	5	4	4	3	3
Curva corriente	8	10	10	9	10	10	8	7	7	7
Regulación [1=I][0=Z]	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

1.5. CONTROL DE POTENCIA EN HORNOS DE ARCO ELÉCTRICO

Para controlar los niveles de tensión e intensidad que se utilizan en el horno durante todo el proceso de manera sencilla, se establecen programas de fusión. En los primeros sistemas el operario podía actuar libremente sobre las tensiones secundarias y sobre los ajustes del sistema de control guiándose por estos programas.

El sistema de control de potencia del HAE de la empresa Acinox Las Tunas resulta ser precisamente como aquellos sistemas donde el operador decide y escoge la potencia que se entrega al proceso (ver figura 1.6), siguiendo un perfil de potencia establecido *en base a la experiencia* [26], y limitado por ciertas normas impuestas

por la empresa eléctrica [27], estas normas obligan a que se consuma la potencia activa tanto al inicio como al final de las coladas en forma de rampas o con escalones de consumos en ascenso y descenso que definitivamente afectan la eficiencia del horno de arco eléctrico. Para la correcta aplicación del programa de fusión y para realizar una toma de decisiones más acertada el operador debe tener cierta experiencia sobre el proceso la cual no se adquiere en poco tiempo.

El programa de fusión con que se cuenta no dicta claramente el orden de cambios de potencia que se deben ir ejecutando durante el proceso ni indica cual es el momento indicado para realizar cada cambio, el operador decide el nivel de potencia a aplicar y realiza estos cambios de acuerdo a sus conocimientos e interpretación de lo que sucede en el proceso basándose en el sonido o las vibraciones que se emiten desde el horno. Algunos se apoyan también en el comportamiento de algunas variables eléctricas que se visualizan en el scada para tomar sus decisiones, dentro de las variables que más tienden a observar están el factor de potencia y las variaciones en la corriente y la tensión de los electrodos.

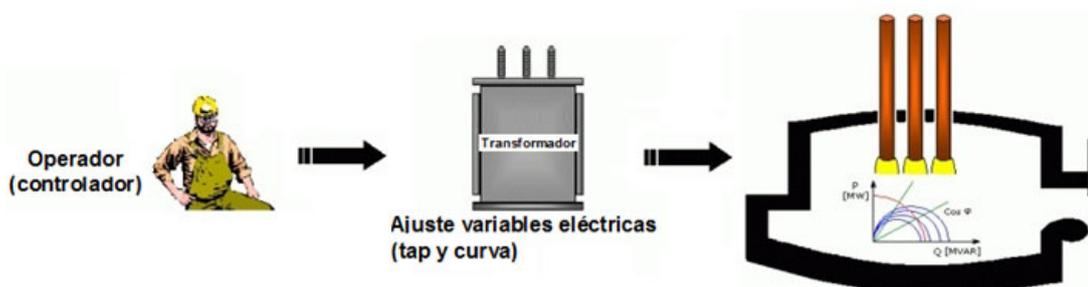


Figura 1.6. Sistema de control de potencia en el HAE de Acinox Las Tunas.

El principal inconveniente de este modo de trabajo es que no todos los operadores interpretan del mismo modo lo que sucede en el proceso y por tanto no ejecutan un régimen eléctrico de igual manera para cada colada, lo que ocasiona que la eficiencia energética en cada turno de trabajo no sea la misma ni la óptima, como ejemplo de esto, en la tabla 1.2 pueden observarse los valores de consumo de energía por colada que promediaron los turnos de trabajo en el mes de septiembre del 2020. Por lo general aquellos turnos que cuentan con operadores y fundidores más experimentados suelen tener los mejores resultados (ver tablas 1.3 y 1.4).

Capítulo 1. Hornos de arco eléctrico: prácticas en el control de potencia.

Tabla 1.2: Promedio del consumo de energía eléctrica por colada de los turnos de trabajo en el HAE en septiembre del 2020.

Turnos de trabajo	Promedio consumo de energía por colada (MW)	Cantidad de coladas
A	35.8	22
B	34.3	29
C	35.4	25
D	33.8	31

Lo que se tiene concebido en la empresa es que el consumo de energía por colada no exceda los 28 MW sin embargo conociendo los problemas que afectan el proceso el *límite de eficiencia por turno es de 32 MW*, de manera que, los valores de la tabla superan lo planificado con lo cual se ve afectado la eficiencia, así como los gastos de la producción.

Tabla 1.3: Consumo de energía eléctrica de los turnos de trabajo en el HAE en el año 2020.

Consumo de energía por turnos de trabajo (MW)				
A	B	C	D	mes
538	570	522	513	ene
550	578	591	543	feb
542	528	505	509	mar
512	590	487	535	abr
578	537	554	536	may
561	599	537	499	jun
561	558	545	541	jul
583	584	542	542	ago
587	584	587	574	sep
583	577	598	581	oct
667	518	574	552	nov
570	566	550	539	promedio

Capítulo 1. Hornos de arco eléctrico: prácticas en el control de potencia.

En la tabla anterior se muestran los consumos de energía que tuvieron los turnos de trabajo en los meses del 2020, al analizarlos se puede constatar que el turno con mejor comportamiento es el D en el cual tanto el operador como el fundidor tienen acumulado un tiempo apreciable de trabajo (ver tabla 1.4).

Tabla 1.4: Años de experiencia acumulados por trabajadores que intervienen en el control de la transferencia de potencia en el HAE de Acinox Las Tunas (hasta el año 2020).

Turnos de trabajo	Ocupación trabajador	Años experiencia
A	operador	3
	1er fundidor	5
B	operador	2
	1er fundidor	7
C	operador	11
	1er fundidor	4
D	operador	15
	1er fundidor	9

El profesor de ingeniería de sistemas energéticos Yadollah Saboohi considera en su artículo acerca de la optimización del proceso en un HAE [28] como subóptima aquella operación de control de potencia que emplea únicamente perfiles de fusión predefinidos y la experiencia del operador, y defiende que *el uso de un marco de optimización basado en modelos paralelos definitivamente puede mejorar los indicadores de desempeño de ese HAE.*

El siguiente paso fue el cambio automático y programado de las tomas del transformador controlando los perfiles de fusión *vía informática*. Un ejemplo de programas se muestra en la tabla siguiente:

Tabla 1.5: Programas eléctricos [32].

Programa	Variables	Pasos									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
2	Tap	11	9	7	4	3	2	2	4	6	6
	Energía [kWh/t]	30	60	100	140	160	180	260	300	500	600

Capítulo 1. Hornos de arco eléctrico: prácticas en el control de potencia.

3	Tap	11	7	5	4	7	8	9	9	9	9
	Energía [kWh/t]	30	65	110	240	370	435	465	490	750	900
10	Tap	11	7	4	2	4	6	11	11	11	11
	Energía [kWh/t]	20	80	140	260	300	700	700	700	700	700

Para que un tap cambie, el programa ha de detectar que tiene que cambiar de paso, y esto se consigue estableciendo un máximo de kWh que puede consumir el transformador en cada uno de ellos. Como es lógico, dado que la energía se mide en kWh/t, cuanto mayor sea la cantidad de chatarra cargada en el horno, mayor será la energía eléctrica que habrá que introducir, y por tanto más tiempo permanecerá en cada paso. Un ejemplo de aplicación de estos programas pudiese ser un esquema de programas 10-2-3 para una colada de 3 cestas donde se aplicaría el programa 10 para la fundición de la primera cesta, el segundo programa para la segunda cesta y el programa número 3 para fundir la última cesta.

El uso del consumo de potencia como criterio para realizar los cambios de un paso a otro es una solución más bien simple sin embargo no considera otros procesos presentes en el horno como la variación de la densidad y la no uniformidad de la distribución de la carga dentro del baño de acero ni se tienen en cuenta otras condiciones asociadas al comportamiento estocástico de los procesos de fundición [33]. A pesar de ser un método viable e incluso mejor que el control semiautomático con que se regula la potencia en Acinox Las Tunas nunca se ha considerado la implementación de este en la entidad. Un sistema como este podría mitigar el problema de las diferencias en los programas de fusión que manejan los distintos operadores lo cual pudiese significar una mayor similitud de los indicadores en los distintos turnos de trabajo. No obstante, hay que señalar que este sistema no garantizaría una buena eficiencia en los procesos que no considera siendo esta su mayor desventaja.

A estos programas informáticos le siguieron unos sistemas de control por ordenador a los cuales se ha integrado gran parte de lo relacionado con el proceso de fusión en

sí. A la computadora le llegan datos de la carga, de la temperatura de las paredes, del arco y, de acuerdo con un modelo metalúrgico de cada tipo de colada y un modelo térmico de comportamiento del horno envía señales requeridas para la elección más adecuada de la potencia [5].

Dentro de las características fundamentales de estos sistemas se pueden citar:

1) Pueden memorizar simultáneamente distintos modelos de operación para el control del horno. Estos modelos se pueden definir en función de la mezcla de chatarras, de su densidad, etc. De igual forma que los sistemas anteriores el avance o progreso de la colada está relacionado con el consumo de energía eléctrica (kWh/t.) en cada uno de los pasos definidos en el modelo.

2) El modelo de operación seleccionado se adapta automáticamente, al conocerse la carga de chatarra, en particular los valores reales del peso de la chatarra que se va a cargar en el horno.

3) El sistema compara los valores reales medidos con los valores objetivos de tensión e intensidad definidos en el modelo de operación seleccionado, con el propósito de que la operación real refleje fielmente ese modelo ideal de operación. La tensión secundaria es seleccionada y cambiada automáticamente, de acuerdo a las diferentes tensiones secundarias definidas en el modelo. La intensidad secundaria se controla por medio del regulador de electrodos, al cual envía las correspondientes señales.

4) En ocasiones se produce una fusión no uniforme entre los tres electrodos, debido a las características físicas del horno, a los diferentes tipos de chatarra, etc. El sistema va detectando el avance de la fusión de la chatarra entre los tres electrodos del horno, para conseguir una fusión uniforme. En líneas generales, las acciones a tomar se pueden resumir en:

Aumentar la intensidad secundaria (disminuir el arco) en el electrodo cuya chatarra ha fundido o está a punto de fundir.

Disminuir la intensidad secundaria (aumenta el arco) en el electrodo cuya chatarra está aún sin fundir.

No se modifican la tensión secundaria ni la intensidad secundaria media, con el propósito de que la potencia eléctrica aportada permanezca constante y la fusión,

sea uniforme, y se realice en el tiempo establecido. Por otra parte, al mantenerse constante el valor de intensidad *secundaria* media se continúa trabajando en el punto de mínimo consumo.

5) Durante la operación en el horno de arco se pueden producir demoras (averías roturas de electrodos, etc.) que afectan al modelo de operación. El sistema permite identificar estas demoras, corrigiendo automáticamente, en caso necesario, el modelo de operación a seguir.

La integración de distintas variables, el análisis de los distintos elementos que forman parte del proceso es un elemento significativo de estos sistemas. Un sistema de control de potencia de este tipo en los hornos de Cuba sin dudas sería un gran paso de desarrollo para las acerías con que cuenta el país. Se podría llevar un mejor seguimiento del funcionamiento de los elementos que intervienen en el proceso de fusión, se contaría con funcionalidades importantes que sin dudas optimizan el proceso de fusión, pero seguiría existiendo el mismo problema que presentan los programas informáticos, estos sistemas de control por ordenador, aunque consideran otros elementos del proceso para la entrega de potencia, según sea el avance la colada, mantienen como principal variable el consumo de potencia.

En la mayoría de los sistemas modernos de control de potencia de los HAE la transición de un estado a otro se realiza en base a la retroalimentación del consumo de potencia [4, 34, 35]. Pero este parámetro no está conectado directamente con el estado de fusión y debido a esto los cambios en el transformador puede que no se realicen en el momento adecuado [12].

Actualmente ARCOS (Siemens VAI, Alemania) [13] y Hireg plus (Danieli, Italia) proveen los sistemas de control de potencia más usados. Los criterios de cambio de los pasos en los perfiles de fusión en ARCOS y Hireg Plus [12] son los mismos, cambian de una configuración a otra de acuerdo a referencias de consumo de potencia [kWh/t]. Los sistemas DECTEQ (Ferrotron, Alemania) y E.M.P.E.R.E. (Spie, Francia) también se rigen por este criterio para la automatización del perfil de fusión, estos sistemas son menos mencionados [12]. Resulta interesante ver que sistemas tan comercializados mantengan este criterio para el cambio de pasos aun conociendo sus desventajas sin embargo esto no quita que sean extremadamente

caros. Su alto costo es sin dudas la principal causa que impide su presencia en Cuba.

1.5.1. INDICADORES DE ARCO Y CONTROL DINÁMICO DE POTENCIA

En los sistemas anteriores el avance de la colada está relacionado con el consumo de energía eléctrica (kWh/t.) en cada uno de los pasos definidos en el perfil de fusión. Para la optimización y control de los procesos siempre es más conveniente definir indicadores de funcionamiento que sirvan como variables de proceso en tiempo real. Es obvio que los HAE consumen un monto considerable de energía eléctrica por lo que es urgente la optimización de este proceso de fusión, lo que hará posible la reducción del consumo de potencia y los ciclos de tiempo de cambio de tap a tap. La retroalimentación de los sistemas de control de potencia es una de las vías para resolver este problema [6-8]. Un sistema de diagnóstico de los estados de la fusión basado en el análisis de la composición de armónicos en las señales de tensión y corriente del arco pudiese aumentar la productividad de los HAE. La efectividad de tal sistema se prueba experimentalmente en [12].

En [9, 10] se establece la conveniencia de utilizar indicadores de estabilidad y de cobertura de arco como variables de proceso en los sistemas de control de la potencia de los HAE empleándolos para la determinación del momento idóneo para el cambio de pasos, de acuerdo a la etapa y condiciones del proceso de fusión. Existen varios métodos para la obtención de estos indicadores, algunos de ellos basados en el análisis de armónicos, de la potencia activa, los niveles de tensión y corriente, etc.

En la figura 1.7 se muestran los valores de los indicadores de estabilidad y cobertura, en éstos se pueden distinguir las diferentes etapas de la colada, de esta manera estos indicadores de las condiciones del arco son sumamente útiles en la definición de las etapas de la colada.

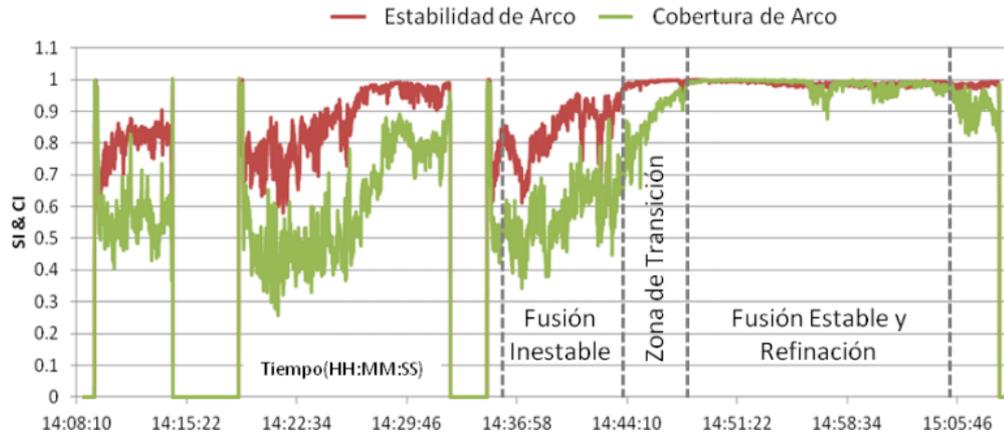


Figura 1.7. Indicadores de estabilidad y cobertura de arco [36, 37].

En la figura 1.8 se muestra una estrategia para el control de la potencia donde se muestra que el nivel de potencia operativa queda definido tanto por el tap seleccionado en el transformador como por la referencia (set point) de corriente (o de impedancia) que finalmente establecerá un valor de longitud del arco a través del sistema de regulación de arco y del sistema de control de electrodos empleando la retroalimentación de los indicadores de estabilidad y cobertura que se dan hacia el control de la potencia.

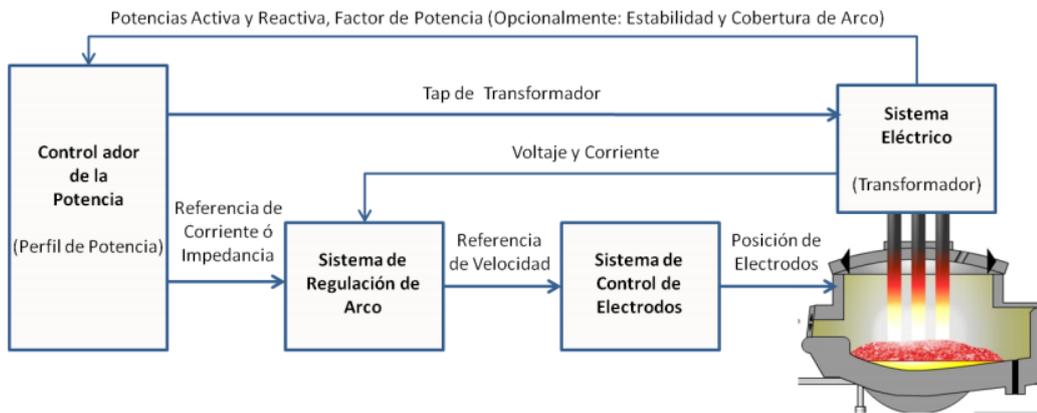


Figura 1.8. Control dinámico de la potencia en un horno de arco eléctrico [9].

En la figura 1.9 se muestra un ejemplo de cómo se realiza la variación de la entrega de potencia de acuerdo a los indicadores de estabilidad y de cobertura del arco.

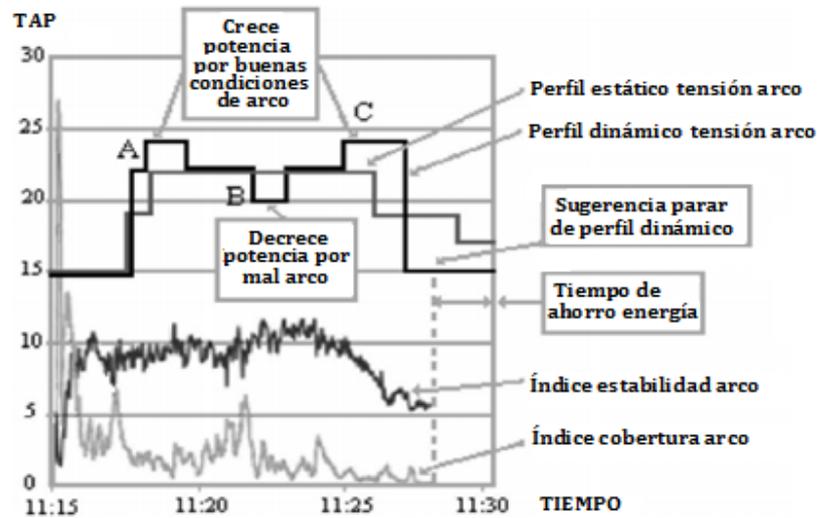


Figura 1.9. Control dinámico de potencia con indicadores de estabilidad y cobertura del arco [10].

En la figura se puede observar que en el punto A se incrementa el suministro de potencia, esto se debe a que, a pesar de que el índice de estabilidad no es excelente si cumple con los requerimientos del sistema y se tiene un buen índice de cobertura lo cual garantiza que el arco trabaje en buenas condiciones, además, en un inicio de colada, luego de que el arco alcanza cierta estabilidad y en donde aún se está en presencia de chatarra es aconsejable incrementar la radiación térmica de los arcos eléctricos transfiriendo mayor potencia eléctrica e incrementando la eficiencia térmica del proceso de fusión. Cuando el arco ya no es tan estable por la condición de que ha bajado el nivel de escoria se entiende que las condiciones no son buenas y se debe de operar con un nivel de tensión y corriente que establezcan arcos más cortos de ahí que se procede a operar con un menor tap, esto se aprecia en el punto B. Por último, cuando el arco es estable y está cubierto de escoria se puede operar a la máxima potencia útil de los arcos eléctricos, esto permitirá mayor transferencia de potencia hacia el baño de acero, esta situación ocurre en el punto C.

1.5.2. SISTEMAS DE CONTROL DE POTENCIA MODERNOS

En la actualidad los sistemas de control de la transferencia de energía eléctrica en los hornos de arco eléctrico forman parte de sistemas de automatización más complejos que engloban además el control de electrodos, la transferencia de energía

química, sistemas que controlan y monitorean prácticamente todo el proceso en sí, sistemas que continúan evolucionando constantemente a medida que se desarrollan las tecnologías necesarias para este fin. A pesar de que la mayoría de los sistemas modernos no realizan un control dinámico regido por variables de proceso tales como indicadores de estabilidad y de cobertura de arco, índices de estabilidad de fase [11], flujo total de calor radioactivo en los paneles del horno y otros nuevos conceptos y métodos que están dando buenos resultados en la optimización del proceso en los HAE si son cada vez más los investigadores que llaman al uso de estas variables e incluso se han desarrollado sensores para medir las mismas [38] y existen sistemas que han puesto en práctica estas novedosas ideas. Como ejemplos de estos modernos sistemas podemos encontrar:

- Danieli Q-MELT: diseñado como un control supervisor integrado de proceso. Reconoce automáticamente las desviaciones del comportamiento esperado y resintoniza el programa de fusión, actuando en el planeamiento de potencia eléctrica, en el programa químico, de la escoria. Este innovador supervisor evalúa el flujo total de radiación en los paneles del horno para modificar las referencias eléctricas, así balancea las cargas térmicas en los paneles enfriados por agua [14].
- Inicialmente Siemens VAI (Alemania) vino con la idea de usar señales de vibración para determinar el nivel de la escoria espumosa al final de cada etapa de fusión. Sin embargo, pruebas en un HAE de 180 MVA mostraron que las señales de vibración también pueden ser usadas como un parámetro para diagnosticar las diferentes etapas del proceso. Debido a esto, este método se usa en el sistema de control de potencia Simetal Simelt (Alemania) [35]. Se pueden encontrar más detalles en [33].
- Los fabricantes europeos desarrollan todos los sistemas de control de potencia modernos. De acuerdo con la tendencia de las últimas décadas de sustituir importaciones en todas las esferas de la economía rusa, el equipo de científicos de la Universidad Técnica Estatal Nosov Magnitogorsk (Magnitogorsk, Rusia) ha diseñado e implementado un sistema de control de potencia para HAE y hornos cuchara (LF) el cual se denomina ASEMC

«RADUGA NPA LF». El vector prioritario en el desarrollo del sistema “RADUGA” es el argumento de la efectividad e implementación práctica de un sistema de diagnóstico de los estados de la fusión de acuerdo al análisis de la composición de armónicos en las señales de tensión y corriente del arco [12].

- ARCOS (Arc Control Optimising System): sistema de regulación que incluye herramientas adicionales para optimizar el control del perfil de potencia, análisis de frecuencia y otros sofisticados artefactos. Estos aditamentos son muy útiles para la optimización del performance de fusión y son incluidos en el sistema sin la necesidad de instalar un sistema de automatización *nivel 2* [13]. A pesar de que este sistema de control realiza los cambios de operación de acuerdo al consumo de potencia cabe destacar que este tiene implementada la medición de parámetros eléctricos y derivados como son el índice de formación de escoria y el índice de estabilidad del arco lo cual refleja la importancia que se le está dando a estas variables.

El campo de la automatización de los sistemas del perfil de potencia en hornos de arco eléctrico es propio de países desarrollados. Los fabricantes europeos desarrollan todos los sistemas de control de potencia modernos [12], sus desarrollos, tal como se veía antes, son significativos, pero no todos los fabricantes de acero por la vía de los HAE pueden contar con estas tecnologías. En Cuba no existen empresas de este tipo, ni existió antes del 2019 algún grupo o proyecto de investigación con tales propósitos. El objetivo de la economía cubana en las últimas décadas ha sido sustituir importaciones, de ahí que se busquen alternativas *eficientes y económicas* para la optimización y desarrollo de los procesos.

El uso del flujo total de radiación en los paneles del horno como variable de proceso para modificar las referencias eléctricas tiene la desventaja de que para una estimación precisa se necesita medir el flujo y la temperatura del agua que circula por los paneles, esto implica la necesidad de flujómetros y sensores de temperatura para cada panel. Para el caso del horno de Acinox Las Tunas, debido a su estructura, un sistema como este implicaría el montaje de estos sensores en el cuerpo del horno donde se expondrían a condiciones extremas, esto significa que

estos elementos deberían tener un grado IP elevado lo que supone un precio elevado y posiblemente una frecuencia elevada de ciclos de mantenimiento.

El método que usa el sistema de control de potencia Simetal Simelt implica un menor número de dispositivos para su funcionamiento, sin embargo, estos también tendrían que tener un elevado grado IP pues, para una mejor precisión, el montaje se realiza en el cuerpo del horno. Además, presenta el inconveniente de que estas mediciones pueden ser corrompidas por vibraciones provocadas por otros elementos que generen vibraciones de semejante magnitud como, por ejemplo, las provocadas por otro horno que se encuentre cerca. En la acería de Acinox Las Tunas, además del HAE también existe muy próximo a este un horno cuchara que, si bien emite vibraciones menores que las del primero son apreciables y el hecho de que estos no trabajen en igualdad de condiciones complejiza la posibilidad de aplicar filtros o métodos para separar las vibraciones emitidas por un horno u otro. En [33] se plantea que estos sensores de vibración tienen un alto costo y un pobre desempeño en condiciones severas como las que se tienen en las plantas de este tipo.

Un sistema de diagnóstico de los estados de la fusión de acuerdo al análisis de la composición de armónicos en las señales de tensión y corriente del arco como método central para el control del sistema "RADUGA" es económico, así como eficiente de acuerdo a los resultados que se han obtenido. En la mayoría de las acerías la composición de armónicos en las señales de tensión y corriente que se manejan en el horno son registradas y controladas por lo que aplicar esta técnica en una de ellas tendría la ventaja de que no sería necesario el empleo de sensores adicionales, pero este no es el caso de la acería de Acinox Las Tunas. Una desventaja de este método es que se requiere el empleo de filtros de media móvil con una constante de tiempo de filtrado grande debido a la fuerte influencia de la longitud del arco y el desequilibrio de fase en la composición armónica de la corriente del arco; la información sobre etapas intermedias de la fusión con una duración cercana a la constante de tiempo de filtración se puede perder [33].

Con anterioridad se explicaron las posibilidades que brindan los índices de estabilidad y cobertura del arco como variables de proceso para distinguir las distintas etapas del proceso de fusión, también se vio como una variable que se

empleaba para determinar los niveles de escoria espumosa sirve a la vez para determinar los estados del proceso de fusión. Con todo esto se pudiera decir que determinar las distintas etapas de la fusión implica la determinación del nivel de cobertura del arco puesto que un arco estable implica un nivel alto de escoria, sin esta lograr una buena estabilidad es muy difícil; mientras que un arco inestable obviamente supone un bajo nivel de escoria espumosa. Si se observa y analiza en la figura 1.9 se puede notar el parecido que poseen los índices de estabilidad y cobertura del arco en cuanto a su comportamiento a medida que va cambiando el estado de la fusión. Dicho esto, se puede arribar a la interesante conclusión de que no se precisa necesariamente el empleo de un indicador de cobertura del arco puesto que el índice de estabilidad de arco refleja el nivel de cobertura del arco, así como el estado de la fusión del acero en un HAE. Existen métodos de obtención de este índice que no necesariamente precisan el análisis de los armónicos para su estimación (ver epígrafe 2.2). El diagnóstico de los estados de la fusión de acuerdo al análisis del índice de estabilidad del arco eléctrico en un HAE es una buena base para el diseño de un sistema que permita optimizar la transferencia de potencia del horno de Acinox Las Tunas.

1.6. LA COMPUTACIÓN SUAVE, LOS SISTEMAS INTELIGENTES Y LOS HAE

En las últimas décadas se han utilizado con gran éxito varias técnicas de inteligencia artificial, tales como la lógica borrosa, las redes neuronales artificiales, los algoritmos genéticos y el razonamiento probabilístico, las cuales se han agrupado bajo el nombre de Computación Suave o Soft Computing. Este nombre es usado para diferenciarla de la computación “dura”, “hard” o tradicional. En palabras de Lotfi Zadeh, reconocido experto mundial en la materia, “es la antítesis de la computación actual, asociada con la rigidez, la fragilidad, la inflexibilidad y la estupidez. Los métodos de la computación dura no proveen de suficientes capacidades para desarrollar e implementar sistemas inteligentes” [39].

Con la introducción de técnicas de inteligencia artificial (IA) en el control y automatización de procesos se ha producido una pequeña revolución: presentándose nuevas vías de solución a problemas tradicionales de control y supervisión, causados por la carencia de conocimiento preciso del sistema. Así es como nace el control

inteligente de procesos, una disciplina en la que los métodos de control se desarrollan para emular algunas características importantes del ser humano, como la adaptación, el aprendizaje, el planeamiento bajo gran incertidumbre y el trabajo con gran cantidad de *datos*.

Como ejemplos de estudios y desarrollos de IA en el campo de la optimización de los HAE para lograr mayor eficiencia energética podemos citar: el trabajo de Czapla con los algoritmos genéticos [15], una aplicación de control usando lógica difusa en hornos de arco eléctrico es planteada Ghiormez [16]. El sistema de regulación de electrodos E.M.P.E.R.E tiene como método primario para el control la lógica difusa [17], también se emplea esta técnica para el monitoreo de la escoria espumosa en [40]. En una conferencia internacional de la IEE en 2006 Hong [41] defiende un sistema de control para un *HAE de CA* basado en una red neurodifusa. Otros ejemplos lo constituyen el uso de redes neuronales artificiales por Gajić [18] y por Raisz [19], proponiendo este último un interesante método con el cual consigue distinguir los distintos estados operacionales de un horno, Lozynskyi [20] emplea un sistema experto para la detección de estos estados lo cual usa como base para escoger el momento adecuado para realizar los cambios de potencia en un HAE para lo cual en el propio artículo propone una red neuronal artificial, el sistema también controla la posición de los electrodos. El hecho de que este sistema propuesto por Lozynskyi incorpore además del control de potencia eléctrica el control de la posición de los electrodos representa una gran ventaja respecto a otros sistemas debido a la relación que tienen estos en el proceso de fusión y es una característica que, como se comentaba en el epígrafe anterior, se observa en los sistemas de control modernos de los HAE, así como el empleo de variables que reflejan el comportamiento del proceso en tiempo real.

En la última década el diagnóstico de los estados o etapas del proceso de fusión ha ganado importancia debido a las ventajas que supone en el área de la transmisión de potencia eléctrica al HAE. Existen varias vías para obtener estos estados, tanto sistemas inteligentes como convencionales, sin embargo, hay que destacar que a pesar de que todos muestran buenos resultados no siempre se pueden emplear, esto dependerá de las condiciones que se tengan. La propuesta de Raisz [19] tiene el

inconveniente de que para su empleo es necesario tener suficientes datos del sistema para el entrenamiento de las redes, mientras que en el caso de Lozynskyi [20], debido a las características propias de los SE, no se precisa de cantidades excesivas de datos pero sí de amplios conocimientos sobre el proceso. En Acinox Las Tunas no se cuenta con registros de los índices de estabilidad y cobertura del arco en el horno, estas variables no se procesan en esta instalación ni se pensaba en su uso hasta ahora. Con lo que sí cuenta la entidad es con especialistas de vasta experiencia que han ganado con años de estudio y trabajo no solo en Acinox Las Tunas, sino también en otras empresas, inclusive de otros países donde han sido requeridos por su dominio del proceso de fusión de acero en hornos de arco eléctrico.

1.6.1. SISTEMAS EXPERTOS

Los sistemas expertos (SE) son programas que imitan el comportamiento de un humano utilizando la información que el usuario le proporciona para darle una opinión sobre cierta materia. Una de sus ventajas es su capacidad de trabajar con grandes cantidades de información, que es uno de los problemas a los que se enfrenta el ser humano; el sistema experto, gracias a su velocidad de procesamiento, analiza todos los datos para aportar una decisión sólida.

Mientras que un experto humano tiene limitaciones y percances propios de su condición humana, es decir: se enferma, envejece, migra a otras empresas, el sistema experto, respecto a sus pares humanos, no sufre de estas cuestiones y se convierte en una herramienta estable para su entorno y fiable porque sus actividades son completamente replicables. Debido a la escasez de expertos humanos en determinadas áreas, los SE pueden almacenar su conocimiento para cuando sea necesario poder aplicarlo. Así mismo los SE pueden ser utilizados por personas no especializadas para resolver los problemas correspondientes. Además, si una persona utiliza con frecuencia un SE aprenderá de él. Finalmente, si se evalúa el costo total del empleo de esta tecnología, la replicabilidad y estabilidad, asociado a la seguridad que provee, resulta una ecuación favorable, aun considerando que las inversiones iniciales pueden ser relativamente elevadas [21].

En la actualidad y ante un mercado diverso y altamente competitivo que exige a las empresas almacenar y analizar una gran diversidad de información, los sistemas expertos se destacan entre las herramientas de soporte para la toma de decisiones. Los mismos han sido diseñados para facilitar tareas en múltiples campos de aplicación y proporcionar resultados equivalentes a los que ofrecería un especialista, emulando la capacidad humana de tomar decisiones de acuerdo a las condiciones del contexto [21].

A continuación, se muestran las diferencias entre el experto humano y el experto artificial lo que a simple vista nos da una idea de porque se justifica utilizar un experto artificial.

Tabla 1.6. Diferencias entre experto humano y artificial.

Experto humano	Experto artificial
No perdurable	Permanente
Difícil de transferir	Fácil
Difícil de documentar	Fácil
Impredecible	Consistente
Caro	Alcanzable
Creativo	No inspirado
Adaptativo	Necesita ser enseñado
Experiencia personal	Entrada simbólica
Enfoque amplio	Enfoque cerrado
Conocimiento del sentido común	Conocimiento técnico

En una situación ideal, un sistema experto es tal que se comporta en la misma forma que lo haría un experto humano sobre lo que se ha construido el sistema, presentando ciertas ventajas respecto al humano. La potencia de un sistema experto se basa más en una gran cantidad de conocimientos que en un formalismo deductivo muy eficaz. La idea que se persigue cuando se construye un sistema experto es la de automatizar la labor del experto humano, partiendo en ocasiones de información insuficiente o incompleta. Dichos sistemas pueden ser utilizados por no expertos para mejorar sus habilidades en la resolución de problemas. Los SE también pueden

ser utilizados como asistentes por expertos. Además, estos sistemas pueden funcionar mejor que cualquier humano experto individualmente tomando decisiones en un área específica y acotada de pericia [42].

Teniendo esto en cuenta, se puede pensar que un sistema experto no es un sistema pensado para reemplazar al experto humano sino para ayudarlo en la toma de decisiones y además supone una descarga del experto del trabajo rutinario y, por lo tanto, la reducción de sus problemas. Entonces podemos resumir que los sistemas expertos ofrecen ayuda para:

- Evitar fallos en labores rutinarias complejas.
- Ampliar de forma más rápida los conocimientos de los especialistas.
- Diagnosticar fallos con mayor rapidez.
- Conseguir tareas de planificación más completas y consistentes.

Los sistemas expertos encuentran uso en las más variadas aplicaciones de los sistemas de potencia [43], son varios los SE que se han desarrollado para lograr un flujo óptimo de energía y un buen control de los perfiles de tensión: Bansilal [22] plantea el empleo de un SE para el alivio de sobrecargas en la redes eléctricas, en el año 2002 Pimpa [23] defiende un sistema scada basado en sistemas expertos para el control de tensión en sistemas de potencia, cinco años después Azmy [24] propone el uso de estos sistemas para el manejo de perfiles de tensión en redes de interconexión, en el 2013 Vaschetti [25] se refiere al control secundario de tensión basado en sistemas expertos y presenta el diseño de un SE para el perfil de tensión en un sistema eléctrico de potencia.

Existen varias formas para crear programas que actúen como sistemas expertos, los primeros y más utilizados son los sistemas basados en reglas, los cuales usan reglas si-entonces para representar el proceso de razonamiento del experto (si la información coincide con ciertas condiciones especificadas, entonces se toman las acciones apropiadas). Algunas otras maneras de diseñar sistemas expertos son: redes semánticas o asociativas, frames, redes neuronales y lógica difusa. Algunos expertos en conocimiento opinan que una parte significativa del razonamiento humano puede expresarse en forma de reglas, lo que les da un interés adicional a los sistemas basados en reglas.

Una regla es una sentencia condicional que está dividida en dos partes. La primera, es la premisa, que está constituida por un número de cláusulas que definen las condiciones para que se cumpla la segunda parte (la conclusión). La estructura de una regla se puede escribir como:

SI <premisa> ENTONCES <conclusión>

Las reglas son una representación simple del razonamiento humano, lo que permite una fácil implementación hacia un programa trasladando el conocimiento experto al lenguaje computacional.

En la figura 1.10 se observan las partes básicas que componen un sistema experto sin embargo es normal encontrar otros componentes que si bien no son estrictamente necesarios contribuyen en el cumplimiento de las tareas de los sistemas expertos [44]. La figura 1.11 muestra un diagrama en bloques de un sistema experto para el control de un sistema de potencia. El sistema es capaz de aprender por medio de un experto, de un usuario o en forma automática, también da la posibilidad de actuar sobre el sistema a controlar en forma automática, o simplemente brinda un asesoramiento sobre los pasos a seguir ante una determinada situación [45].

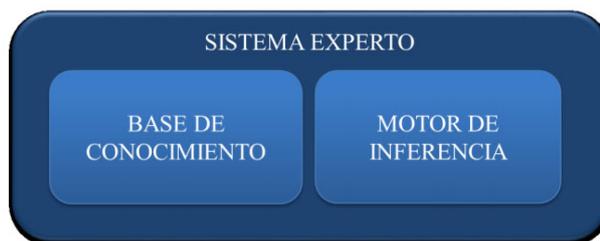


Figura 1.10. Componentes básicos de un Sistema Experto [44].

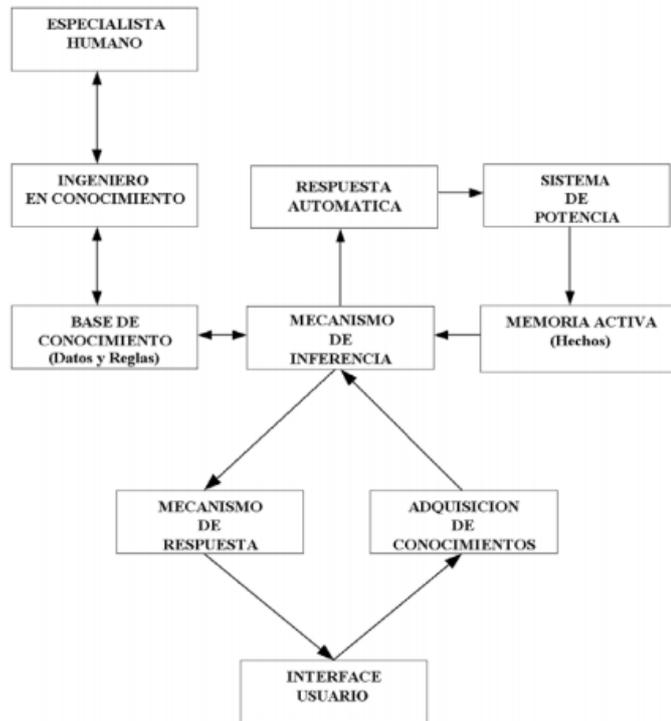


Figura 1.11. Diagrama en bloques de un sistema experto para el control de potencia [43]. Por otro lado, en la figura 1.12 se muestran un grupo de pasos que se recomiendan para el desarrollo de un SE.

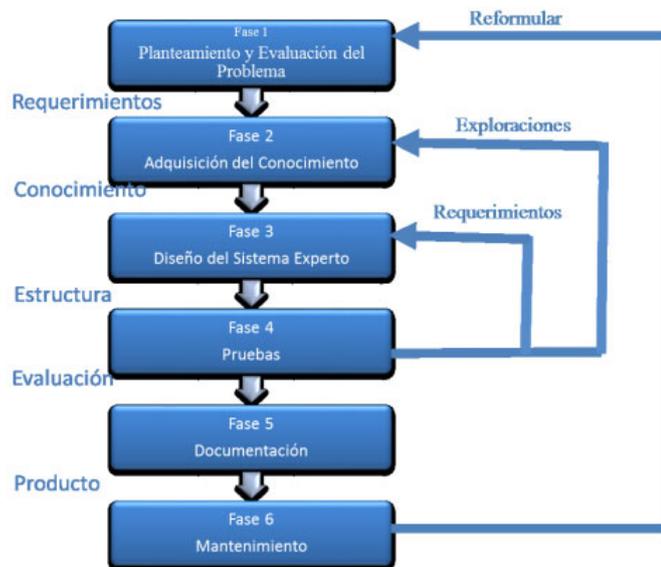


Figura 1.12. Pasos para la construcción de un Sistema Experto [44].

Los SE en tiempo real deben enfrentar características específicas dependiendo de la aplicación. Entre éstas, figuran interactuar con ambientes externos (control de parámetros mediante sensores), manejar variables que pierden validez en el tiempo, enfrentar fallas del sistema, coordinar eventos asíncronos, lograr una operación continua del sistema, garantizar tiempos de respuesta, etc. Por estas razones, se requiere contar con un software que sea capaz de integrar estas necesidades de manera sencilla y amigable para el desarrollador.

Teniendo en cuenta que la complejidad del proceso de fusión en un horno de arco eléctrico es muy alta, que no existen modelos matemáticos precisos, que es un sistema altamente no lineal, así como las características de los SE, las ventajas que reportan en cuanto al apoyo en la toma de decisiones y las aplicaciones que estos han tenido como soluciones probadas para sistemas de potencia eléctrica se considera viable el empleo de esta técnica para dar solución al objetivo de este trabajo, el cual tendrá la propiedad de realizar su función de acuerdo a los estados del proceso de fusión en el HAE para lo cual se procesará el indicador de estabilidad del arco *de la manera más económica y precisa posible*, lo cual dependerá del método que se emplee para la obtención del mismo.

CONCLUSIONES

1. Se realizó una breve mirada a la historia del horno de arco eléctrico donde se refleja la evolución y desarrollo de este, fundamentalmente en los últimos tiempos, aquello que lo ha llevado a ser una pieza clave en la producción de acero a nivel mundial y que le confieren un futuro prometedor.
2. Se abordó cómo se generan los perfiles de fusión y cuáles son sus principales características, así como los detalles fundamentales de algunos sistemas de control de potencia en hornos de arco eléctrico, incluyendo el que se encuentra en la empresa de aceros Acinox Las Tunas.
3. También se revisó la conveniencia del empleo de indicadores de arco en el control dinámico de potencia en hornos de arco eléctrico.
4. De manera breve, pero concreta se tratan los sistemas inteligentes y las ventajas que reporta el empleo de estos en los sistemas de control de los HAE, fundamentalmente los SE por las posibilidades que brindan para el

control y monitorización de procesos complejos, como es el caso de los sistemas de potencia de hornos de arco eléctrico.

De acuerdo a la información analizada y las condiciones del proceso que se tiene en Acinox Las Tunas se plantea el diseño de un sistema experto para el apoyo en la toma de decisiones para la transferencia de energía eléctrica al horno, el cual basará sus decisiones de acuerdo a las etapas del proceso de fusión, en el procesamiento de variables de proceso como el índice de estabilidad del arco.

Capítulo 2. SACPOT-HAE: HERRAMIENTA PARA LA OPTIMIZACIÓN DEL RÉGIMEN ELÉCTRICO DE UN HAE.

INTRODUCCIÓN

En menos de 50 años las acerías con hornos de arco eléctrico han pasado de ser instalaciones funcionales simples de bajo costo y pequeño volumen de producción a ser plantas con tecnología continuamente en desarrollo capaces de producir mayores volúmenes de cualquier tipo y calidad de acero. La energía eléctrica es su principal insumo energético, por lo tanto, el control de los parámetros eléctricos que definen el nivel de potencia es muy crítico para una operación eficiente.

En este capítulo se exponen las características específicas del sistema de ayuda para el control de potencia en un horno de arco eléctrico SACPOT-HAE desarrollado con el objetivo de optimizar el régimen eléctrico en el horno de la empresa Acinox Las Tunas. Se destacan las ventajas que este ofrece además de los algoritmos y conceptos empleados.

2.1. GENERALIDADES DEL SISTEMA PROPUESTO

El estado actual de la industria de producción de metales se caracteriza por el crecimiento continuo de los aceros fundidos en hornos de arco eléctrico. Estos se caracterizan por una carga altamente dinámica, no lineal y asimétrica. El funcionamiento de los hornos de arco también se acompaña de cortocircuitos tecnológicos y quema de arcos inestables y discontinuos y se pueden producir oscilaciones de la potencia del arco, que son conmensurables con la potencia del transformador del horno.

Durante la explotación de los HAE han surgido cuatro problemas importantes:

- Asegurar la máxima potencia de arco mientras se funde la carga sólida.
- Estabilización cualitativa de la potencia del arco.
- Minimización de pérdidas de potencia específicas.
- Limitar el impacto de carga variable y no lineal en un sistema electroenergético.

Capítulo 2. SACPOT-HAE: herramienta para la optimización del régimen eléctrico de un HAE.

En general, estos problemas son contradictorios y solo pueden resolverse estableciendo algunos compromisos. La solución de la tarea mencionada requiere mejoras de la tecnología de fusión, desarrollo de nuevos sistemas de fusión más eficientes, creación de sistemas inteligentes jerárquicos y multicircuitos de alta velocidad para control del régimen eléctrico [20].

Las grandes oscilaciones de amplitud de la corriente de arco provocan vibraciones y fuerzas electrodinámicas significativas en los devanados de los transformadores y los motores eléctricos, lo que reduce su fiabilidad funcional y su vida útil. Esto se debe principalmente a la baja precisión dinámica del control de los parámetros del régimen eléctrico.

En cuanto a la evaluación técnica y económica, se sabe que el control óptimo de la fusión eléctrica es dos o tres veces más eficiente que las soluciones destinadas a estabilizar los parámetros del régimen eléctrico [46]. Por lo tanto, los principales métodos para aumentar la eficiencia eléctrica y técnica de la fusión en hornos de arco de acero están representados por el desarrollo de sistemas de control óptimos destinados a minimizar la dispersión del régimen eléctrico y su estabilización en valores óptimos [20].

Uno de los requisitos previos para garantizar la producción de aceros y aleaciones con las propiedades físicas y químicas deseadas y con alta eficiencia tecnológica y económica durante el proceso de fusión es la síntesis e implementación del control en función de la etapa tecnológica de fusión [20].

Tomando en consideración estos criterios, las ideas expuestas en el capítulo anterior y las insuficiencias que existen en la transferencia de potencia en el horno que se encuentra en Acinox Las Tunas se realiza el diseño de esta propuesta para ayudar a los operadores en el manejo del régimen eléctrico durante el proceso de fusión con el objetivo de lograr mejorar la eficiencia eléctrica.

El sistema inteligente concebido, denominado SACPOT-HAE (Sistema de Ayuda para el Control de Potencia en un HAE) está formado por varios subsistemas donde se emplean técnicas de la inteligencia artificial para desarrollar sus funciones (ver figura 2.1). Para su concepción se tuvieron en cuenta la naturaleza real del proceso de fusión en el HAE de Acinox Las Tunas, las experiencias acumuladas por varios

Capítulo 2. SACPOT-HAE: herramienta para la optimización del régimen eléctrico de un HAE.

expertos que laboran en la entidad y los estudios e investigaciones realizadas por científicos e ingenieros en diferentes partes del mundo.

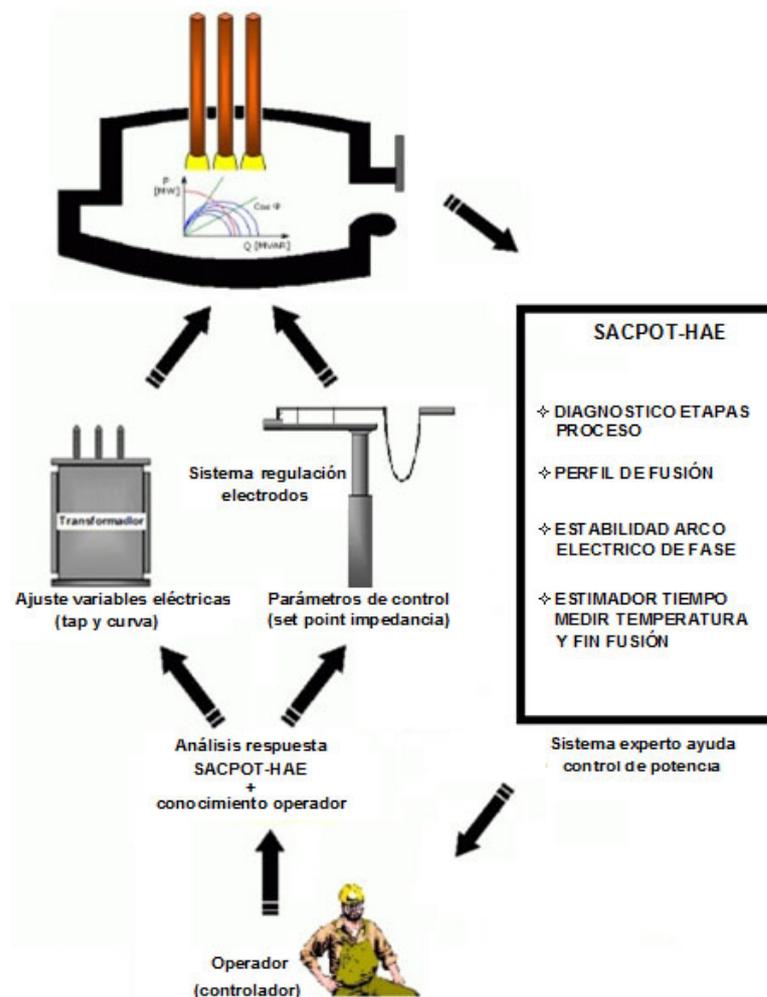


Figura 2.1. Sistema propuesto para el control de la transferencia de energía eléctrica en el HAE de Acinox Las Tunas.

Entre las características fundamentales de este sistema están las facilidades que brinda para la introducción de nuevos códigos y mejoras, para la modificación de parámetros, y para el mantenimiento en general; lo que es propiciado por la técnica de IA seleccionada para conformar el SACPOT-HAE: los sistemas expertos.

Una de las fortalezas que tiene este sistema es su capacidad de integrar diferentes funciones relacionados con otros sistemas que intervienen en el proceso de fusión, esto es característico de los sistemas de control actuales y es precisamente lo que

ha garantizado un desarrollo sorprendente en la operación de los HAE. El sistema desarrollado en esta investigación tiene la capacidad de emitir un mensaje al operador sobre qué parámetro eléctrico emplear para un mejor control de potencia, objetivo fundamental. También tiene concebido por diseño el análisis de estabilidad del arco eléctrico de cada fase con lo cual advierte sobre problemas en el controlador de los electrodos e incluso sugiere posibles acciones a realizar en los parámetros del control para su optimización hasta tanto se resuelva el problema, elemento que definitivamente influye en la eficiencia eléctrica. Ningunas de estas acciones se toman en cuenta ni se realizan en el sistema con que se cuenta actualmente en el horno de Acinox Las Tunas.

Otro elemento que distingue al SACPOT-HAE es la introducción de un método novedoso para la detección del momento adecuado para realizar las mediciones de temperatura, en correspondencia con estas el sistema es capaz de orientar al operador respecto al momento adecuado para concluir la fusión del acero.

2.2. DIAGNÓSTICO DE LOS ESTADOS DEL PROCESO DE FUSIÓN DEL ACERO EN UN HAE

En el capítulo anterior fueron destacados algunos ejemplos de métodos que se han puesto en práctica para lograr detectar las etapas de fusión del acero en los HAE los cuales han tenido buenos resultados sin embargo existen otros que pueden resultar eficientes a la vez que más económicos. También se resaltaba la conveniencia del empleo de indicadores de estabilidad del arco, concretamente, cuando el sistema tiene un estado de buena estabilidad de arco, el operador aumenta la potencia o la disminuye cuando tiene una pobre estabilidad [47].

Los ingenieros, han introducido varios métodos para la estimación de la estabilidad del arco en su mayoría basados en el procesamiento de variables eléctricas, entre ellas los armónicos (ver epígrafe 1.5.2), dichos métodos no requieren elementos de medición adicionales pues se pueden obtener de variables que se miden de ante mano, además presentan ventajas, según el modo de obtención de la información.

2.2.1. ALGUNOS MÉTODOS EXISTENTES

En años recientes se han publicado varios artículos que evalúan la estabilidad de arco del CA en el dominio de tiempo. *Algunos investigadores emplean el modelo*

numérico de arco eléctrico para encontrar el criterio de estabilidad del arco. El modelo de arco de Cassie-Mayr es bien conocido por su característica de representar con éxito las características del arco [48]. A partir de este modelo, se deduce que la inclinación de la corriente del arco en la corriente cero (CZ) reduce la resistencia máxima del arco cerca de CZ a un valor bajo y mantiene el arco estable [46, 49]. Este análisis es teóricamente valioso, pero se enfoca solo en el cruce por cero de la corriente de arco cerca de CZ sin tomar en cuenta el patrón de tensión/corriente del arco.

Existen propuestas de índices de estabilidad del arco usando tensión y corriente de fase. Uno de ellos emplea la tensión virtual de neutro a tierra como medida de la estabilidad del arco de CA [37]. En el artículo, se define un punto neutro virtual físicamente imposible y la tensión entre el punto y tierra se calcula a partir de cada tensión de fase. Luego, el valor RMS de la tensión virtual de neutro a tierra se calcula para el índice de estabilidad del arco. Este método incluye la consideración de la forma de onda de la tensión. La corriente que indica la ignición del arco es más significativa que la tensión, pero este índice de estabilidad no contiene la forma de onda de la corriente lo cual supone una desventaja. Para superar este problema se emplea la potencia eléctrica de fase [50]: se calculan los valores RMS de la potencia de fase y se selecciona la potencia mínima entre las tres fases como índice de estabilidad del arco. Dicho método tiene un excelente desempeño para encontrar el período de arco extinguido, pero su efectividad durante el período de arco estable es insuficiente.

Existen otros métodos y estudios que buscan determinar de manera efectiva la estabilidad del arco, un ejemplo lo podemos encontrar en [51] donde correlacionan esta variable con la estabilidad de la tensión. La estabilidad de arco de un horno se analiza respecto a la variación de la inductancia basado en la teoría de la bifurcación en [52]. En [53] se propone el análisis de los valores pico de la resistencia dinámica del arco cuando existen cruces por cero de la corriente. Una técnica de optimización de dos pasos considerando la naturaleza estocástica de la longitud del arco se presenta en [54]. El desarrollo de un sensor que da como salida un índice de

estabilidad del arco obtenido a través del procesamiento de señales magnéticas en los cables conductores de los electrodos es tratado en [38].

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 poco la estabilidad de cada fase, importante para la optimización del controlador de electrodos que es capaz de controlar cada electrodo por separado. En [11] 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 pero que al depender de varias variables implica mayor carga de cálculo, no obstante 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.

Otras vías para la estimación de las condiciones del arco se basan en el procesamiento de las vibraciones y el sonido. En [55] encontramos una propuesta muy interesante basada en señales acústicas que demostró excelentes resultados al compararla con otros métodos. 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 ruido industrial, eliminando una de las principales desventajas de los métodos no invasivos basados en señales acústicas. En general los métodos basados en el sonido precisan un menor costo en equipos necesarios 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* puede no resultar efectivo su empleo.

2.2.2. ÍNDICE DE ESTABILIDAD DE ARCO BASADO EN LA IMPEDANCIA

SeungHun Kim y otros investigadores en [50] plantean que las tensiones y corrientes de fase pueden ser empleados para decidir 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 (ver ecuación 2.2) por lo que es válido el análisis de esta para la obtención de un índice de estabilidad con el cual identificar los estados del proceso de acuerdo a su

Capítulo 2. SACPOT-HAE: herramienta para la optimización del régimen eléctrico de un HAE.

comportamiento. Si se observa y analiza la figura 2.2 se puede ver claramente como a medida que avanza el proceso de fusión de una cesta las curvas de impedancia de cada fase van cambiando de forma descendente en tanto el proceso de fusión va avanzando y tornándose más estable. Por tanto, la impedancia se puede utilizar para juzgar si el arco es estable o no. Esta propuesta de índice de estabilidad nunca ha sido tratada ni analizada por ningún experto en el tema sin embargo puede resultar beneficioso al igual que efectivo su empleo.

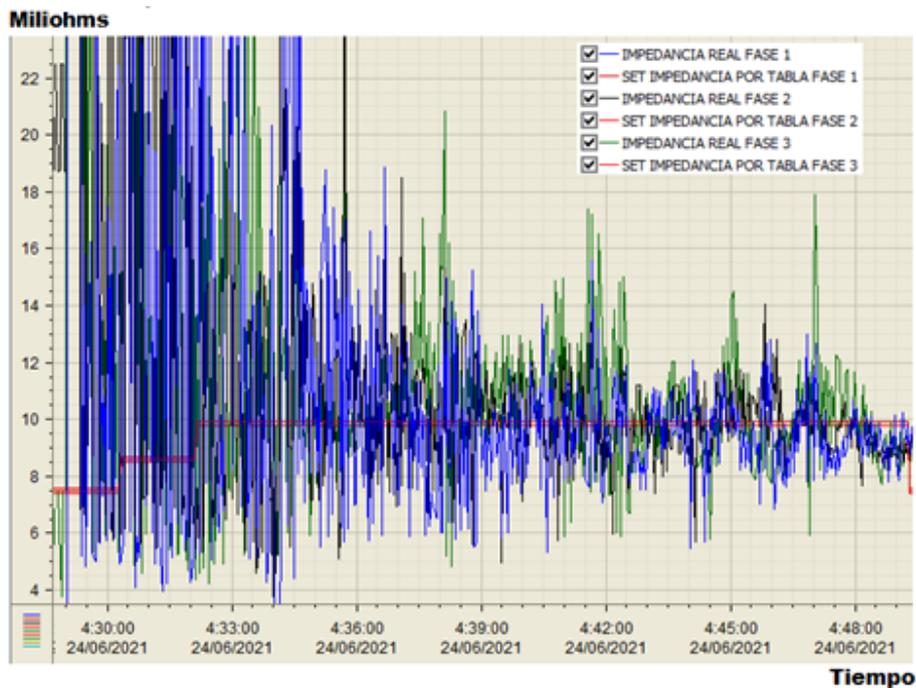


Figura 2.2. Gráficos de impedancia de fase durante desarrollo de la fusión de una cesta en el HAE de Acinox Las Tunas.

Para el cálculo de este índice se parte de obtener los valores RMS de las tensiones de fase empleando la ecuación 2.1:

$$V_i = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N V_i^2(k)}, \quad i = R, S, T \quad (2.1)$$

Donde V_i significa 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 2.2:

Capítulo 2. SACPOT-HAE: herramienta para la optimización del régimen eléctrico de un HAE.

$$Z_i = V_i / I_i, \quad i = R, S, T \quad (2.2)$$

Una vez que se obtienen los valores de la impedancia de fase Z_i a partir de los valores de V_i y de las corrientes de fase I_i el próximo paso contemplado en esta propuesta es el cálculo de la desviación estándar de estos con respecto al valor de referencia (set point) de impedancia que se ha seleccionado para la regulación de los electrodos (ver ecuación 2.3), esto tiene como ventaja que además de obtener la estabilidad del arco eléctrico tendremos un índice que reflejará la eficacia del sistema de control de los electrodos. En aquellos hornos donde se realiza este de acuerdo a la impedancia se tendrá el valor del set point sin embargo en los sistemas que realizan el control de acuerdo a la corriente se deberá obtener este parámetro dividiendo el set point de tensión y el valor de referencia de la corriente. Mientras más inestable sea el sistema de potencia mayor dispersión existirá en las mediciones de impedancia y por tanto mayor desviación estándar de estas con respecto al valor que se desea lograr.

$$Z_{index_i} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N (Z_{ij} - Z_{setpoint_i})^2}{N-1}}, \quad i = R, S, T \text{ y } j=1, 2, 3, \dots, N \quad (2.3)$$

Donde Z_{index_i} representa las desviaciones estándar de fase y $Z_{setpoint_i}$ es el valor de impedancia de fase deseado. Una vez que se tienen estos valores se puede discernir el nivel de estabilidad del arco eléctrico de cada fase de manera independiente con lo cual estos se pueden considerar como índices de estabilidad de arco de fase.

Cabe señalar que en caso de que existan desviaciones sostenidas en el control de los electrodos con respecto a la referencia no quiere decir que necesariamente se vayan a tener arcos inestables (ver figura 2.3). Sin embargo, cuando se realice el cálculo del índice de estabilidad de acuerdo a la referencia obviamente los cambios en sus resultados advertirán del problema en sí pero también reflejará, de acuerdo a los rangos preestablecidos en el sistema en que se esté empleando este índice, la existencia de arcos inestables debido a la diferencia con respecto al set point cuando no necesariamente tendría razón de existir. Esto requerirá cambios en los rangos definidos en el sistema en el cual se emplee, de lo contrario, hasta tanto no se

Capítulo 2. SACPOT-HAE: herramienta para la optimización del régimen eléctrico de un HAE.

solucionen los errores ocasionados por la regulación de los electrodos, el sistema que se retroalimenta del índice no será eficiente puesto que diagnosticará un arco inestable cuando no lo hay debido a esa variación en el rango de estimación. Debido a esto último se recomienda emplear este índice de estabilidad, así como todos aquellos que emplean las referencias de control para su procesamiento, siempre y cuando se cuente con un control de electrodos efectivo.

Para el caso en que no se cuente con un controlador fiable lo recomendado es realizar el cálculo de la desviación con respecto al promedio en lugar de la referencia. De esta manera se obtendrán valores que reflejarán el estado del arco eléctrico más sin embargo no se podrá diagnosticar el mal funcionamiento del controlador de los electrodos para casos similares al de la figura 2.3 donde, a pesar de no existir una mala estabilidad del arco, si se puede notar como la impedancia real está por encima de la referencia. Estos casos suelen verse en los controladores proporcionales, justamente como el que se encuentra en el HAE de Acinox Las Tunas, de donde se obtuvieron los gráficos que se presentan en la figura antes mencionada. Puesto que en este trabajo de investigación se considera de gran importancia la fortaleza que brinda el determinar la eficacia del sistema de control de los electrodos se emplea la referencia para los cálculos del índice de estabilidad.

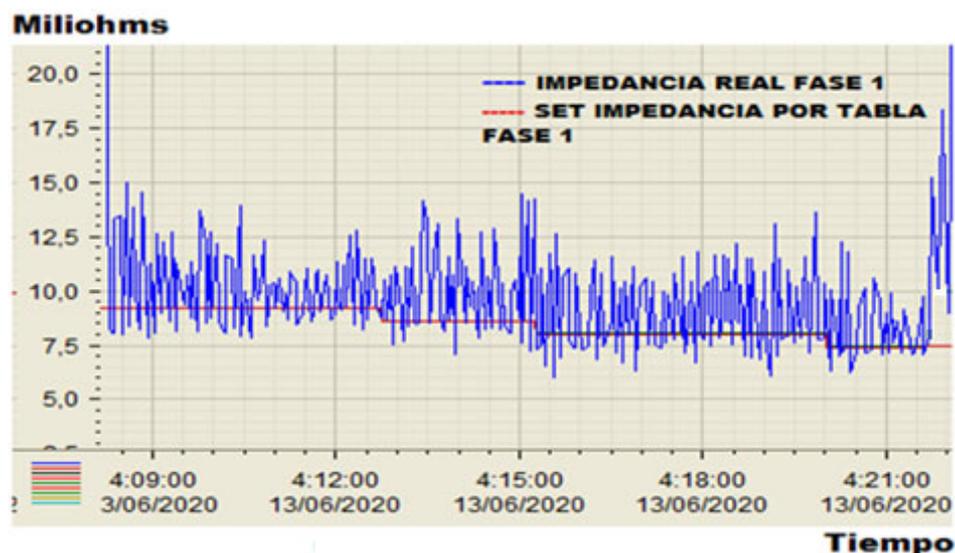


Figura 2.3. Gráficos de impedancia de fase 1 durante desarrollo de fusión de una cesta en el HAE de Acinox Las Tunas.

Capítulo 2. SACPOT-HAE: herramienta para la optimización del régimen eléctrico de un HAE.

Adicionalmente, es posible desarrollar un índice de estabilidad de arco general basado en la estabilidad de arco de fase. El sistema es considerado inestable, si al menos uno de los arcos de una de las fases es inestable. Para cubrir todo el sistema, este índice se toma como el valor máximo de la desviación estándar de la impedancia de fase (ver ecuación 2.4):

$$Z_{index} = \max(Z_{index_i}), i=R, S, T \quad (2.4)$$

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

El cálculo de este índice se realizó durante la fusión de una colada en el HAE de Acinox Las Tunas y se evaluó su desempeño mostrando un rendimiento similar a otros índices (ver figura 2.4).

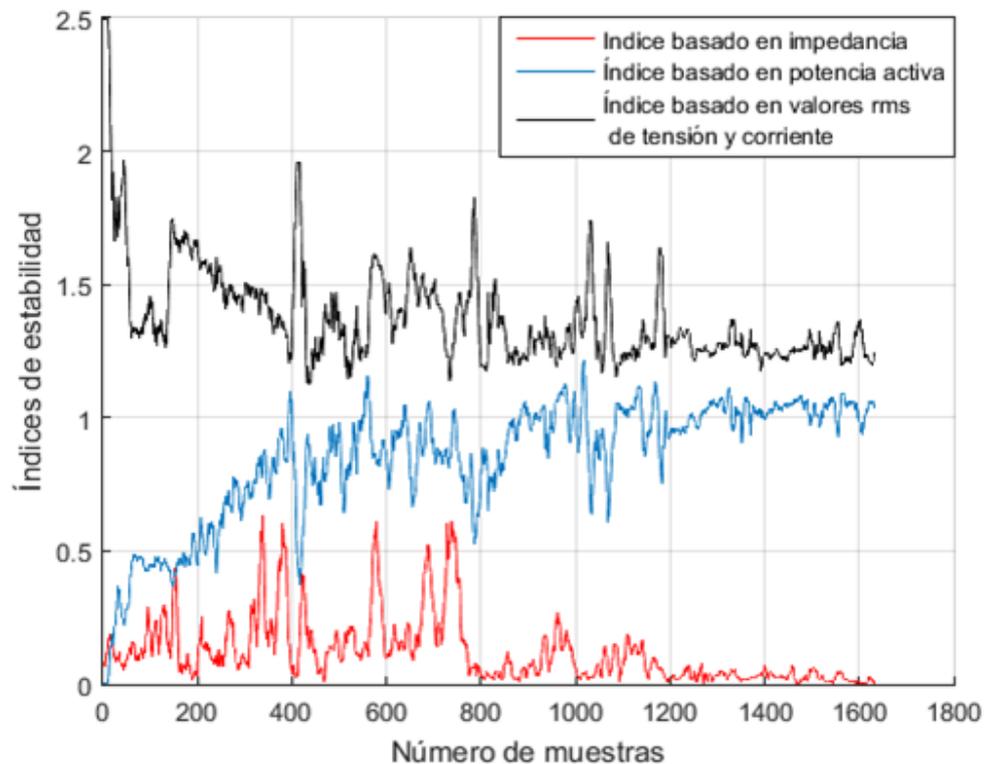


Figura 2.4. Comparación de distintos índices de estabilidad del arco durante la fusión de una tercera cesta.

Como se puede observar en la figura 2.4 el comportamiento del índice basado en la potencia activa a diferencia de los restantes tiende a ascender, mientras que los otros hacen justamente lo contrario. Esto está dado por la naturaleza del método de

cálculo que se emplea para su obtención. Cabe agregar que los valores de cada índice mostrado no son reales, se les aplicó un factor de multiplicación para lograr que se viera mejor las características de cada uno en un mismo gráfico, aunque dicho factor no altera su comportamiento.

Entre las ventajas que podemos encontrar en este índice está la facilidad de cálculo puesto que se emplean fórmulas matemáticas no complejas y muy utilizadas en la rama industrial y de procesamiento de datos. No se precisa el empleo de instrumentos de campo adicionales para realizar las mediciones puesto que las variables requeridas para su obtención se miden en todos los procesos de fusión por vía horno de arco eléctrico. Resulta el método ideal puesto que con este se puede dictaminar además del estado de la fusión la precisión del control de los electrodos, elemento de suma importancia para estas instalaciones y que hace que este método sea aún más atractivo.

2.3. SISTEMA EXPERTO PARA EL CONTROL DE POTENCIA EN EL HAE DE ACINOX LAS TUNAS

Si se revisa el documento “Práctica operativa de fusión en el HAE de ACINOX Las Tunas” [26] se puede apreciar que no se tienen en cuenta distintas situaciones anormales que se pueden dar en el proceso de fusión, se deja abierta la decisión de taps a emplear por el operador durante la fusión así como los momentos en que estos deben cambiar salvo al inicio y fin de colada los cuales están limitados e impuestos por criterios de la UNE [27]. Estos elementos y otros se tendrán en cuenta en el sistema que se propone además de los criterios que emplean los expertos en el tema para la toma de decisiones en los diferentes casos.

Dentro de las características fundamentales que debe tener están:

- ✓ Memorizar simultáneamente distintos modelos de operación para el control del horno definidos en función del tiempo de operación, de la ocurrencia de averías, y de la cantidad de cestas por colada. El avance o progreso de la colada está relacionado con la etapa de fusión la cual se determina de acuerdo al índice de estabilidad del arco. El modelo de operación seleccionado se adapta automáticamente, al conocerse el tiempo de

operación el cual estará en función, además de las necesidades de la planta, de la ocurrencia de averías y del tipo de avería que se ha producido.

- ✓ En ocasiones se produce una fusión no uniforme entre los tres electrodos, debido a las características físicas del horno, a los diferentes tipos de chatarra, a problemas asociados al sistema de control de los electrodos, etc. El sistema va detectando el avance de la fusión de la chatarra entre los tres electrodos del horno (revisando el valor del índice de estabilidad de fase), en caso de que exista una fase con una estabilidad lejana de la que posean los otros dos el sistema deberá informar al operador. De esta manera este o el personal autorizado podría actuar sobre el set point de regulación del electrodo en cuestión, sobre los elementos asociados a su control o distribuir la chatarra ubicada debajo del electrodo con tal de mejorar la estabilidad del arco eléctrico de esta fase.
- ✓ Efectuar la medición de temperatura en el momento inadecuado provoca considerables pérdidas energéticas y de tiempo de producción. Por tanto, informar al operador que debe realizar la medición de temperatura de acuerdo al estado de la fusión es otro objetivo importante de este sistema inteligente.
- ✓ La temperatura alcanzada por el baño es el parámetro clave para determinar el fin del proceso. Siempre que se obtenga una medición adecuada de temperatura y el estado de fusión lo permita el sistema debe ser capaz de sugerir al operador el mejor momento para dar por finalizada la fusión.

2.3.1. SISTEMA DE DETECCIÓN DE ETAPAS DEL PROCESO DE FUSIÓN EN EL HAE DE ACINOX LAS TUNAS

De manera general un HAE presenta varios estados de funcionamiento. Para la concepción del SACPOT-HAE se mantienen aquellas etapas ya vistas con antelación (ver epígrafe 1.2), ahora determinadas mediante el índice de estabilidad del arco eléctrico. Sin embargo, teniendo en cuenta las nuevas funcionalidades que tiene el sistema en cuestión, se ha decidido añadir una nueva etapa. De modo que se contemplan y enmarcan, de acuerdo a la estabilidad del arco, las etapas de la siguiente manera:

Capítulo2. SACPOT-HAE: herramienta para la optimización del régimen eléctrico de un HAE.

- Etapa 1 (Perforación): en esta etapa se tiene un arco eléctrico muy inestable con lo cual el índice de estabilidad del arco tendrá valores altos.
- Etapa 2 (Fundición): se tiene un arco más regular, aunque con variaciones importantes que posibilitará un índice de estabilidad medio.
- Etapa 3 (Baño Plano): el arco es más estable, el índice alcanzará valores pequeños.
- *Etapa 4 (Acero Listo)*: nueva etapa definida como el momento idóneo para realizar medición de temperatura del acero líquido en caso de que se esté fundiendo la última cesta y en función del valor obtenido marcaría el fin de fusión de la colada. En caso de que no se trate de la última cesta indica directamente el fin de fusión de la misma. Esta etapa está caracterizada por un arco muy estable y un índice de estabilidad del arco muy pequeño que se mantiene sin variaciones.

Una vez se tienen las etapas y el criterio de trabajo para el diagnóstico de las mismas, se considera además esperar un tiempo siempre que se produzca un cambio de etapa para corroborar que la transición sea inminente. Estos elementos se entienden como la base de conocimientos de este importante y fundamental subsistema del SACPOT-HAE, a partir de la cual quedan definidas las siguientes reglas (ver tabla 2.1):

Tabla 2.1. Reglas del subsistema “Diagnóstico de etapas del proceso”.

R1	IF índice de estabilidad es alto THEN etapa de fusión presente es Etapa 1.
R2	IF índice de estabilidad es medio AND tiempo de transición ha transcurrido THEN etapa de fusión presente es Etapa 2.
R3	IF índice de estabilidad es pequeño AND tiempo de transición ha transcurrido THEN etapa de fusión presente es Etapa 3.
R4	IF índice de estabilidad es muy pequeño AND tiempo de transición ha transcurrido THEN etapa de fusión presente es Etapa 4.

Cabe señalar que cuando se hace referencia a valores del índice de estabilidad de arco altos, medios, pequeños y muy pequeños, no se trata de un único valor para cada caso sino de rangos de valores que se definen de acuerdo a las características

Capítulo2. SACPOT-HAE: herramienta para la optimización del régimen eléctrico de un HAE.

y naturaleza del HAE donde se implementa el sistema y a los criterios de los expertos.

2.3.2. PROGRAMA ELÉCTRICO DE FUSIÓN

Teniendo en cuenta las limitaciones e imposiciones que contiene la práctica operativa actual del horno de Acinox Las Tunas, los criterios de expertos que allí laboran basados en su experiencia y estudios que han podido realizar en la instalación, los elementos vistos durante la investigación del presente trabajo así como los objetivos trazados en el mismo se elaboraron un grupo de modelos de trabajo a partir de los cuales se define la siguiente base de conocimientos del subsistema principal del sistema experto SACPOT-HAE, el “Perfil de fusión” (ver tabla 2.2).

Tabla 2.2. Base de conocimientos del subsistema “Perfil de fusión”.

C1	El proceso de fusión de cada cesta inicia y termina con tap 3 y curva 3 (limitante de la UNE).
C2	La rampa de trabajo (la decide la UNE) marca el tiempo en que se estará trabajando al inicio y al final de la colada en tap 3 y curva 3. Este tiempo no se viola aun cuando la etapa de fusión posibilítase o no realizar un cambio que repercuta para bien en el proceso.
C3	Los taps que se emplean, además del tap 3, son el 15, 17 y 19 y las curvas son la 1 y la 3. Estos se seleccionan de acuerdo a la etapa del proceso, al tiempo de operación, al número de cesta que se esté fundiendo y a la cantidad de cestas con que se va a elaborar la colada.
C4	El tiempo de operación lo define el operador en dependencia del estado de las otras áreas donde continúa el proceso (horno cuchara (HC) y la máquina de vaciado continuo (IVC)), de la disponibilidad eléctrica (hay ocasiones en que la red eléctrica nacional no es capaz de aguantar el empleo del tap 19) y de la proporción de averías o interrupciones que ocurran.
C5	El fin de fusión de cada cesta depende de la etapa de fusión, para el caso de la última cesta involucra además el valor de la temperatura del acero líquido.

Capítulo2. SACPOT-HAE: herramienta para la optimización del régimen eléctrico de un HAE.

La base de conocimientos se forma en algunos casos con los datos o indicaciones del fabricante como en C1 y C2, con estudios teóricos y con conocimientos heurísticos como en C3, C4 y C5. Las reglas son la expresión formal de la base de conocimientos que definen al algoritmo. Es necesario a partir de este conocimiento construir el conjunto de reglas que serán gestionadas por el sistema experto. A partir de la base de conocimientos se puede definir el conjunto de reglas de la tabla 2.3 y 2.4. En ninguno de estos conjuntos se han definido las reglas que marcan el fin de la fusión de cada cesta debido a que estas forman parte de otro subsistema que se definirá en el epígrafe 2.3.4.

Tabla 2.3. Reglas derivadas de la base de conocimientos del subsistema “Perfil de fusión” para colada de 4 cestas.

R1	IF inicio de fusión THEN se debe usar tap 3 y curva 3.
R2	IF se está trabajando con tap 3 y curva 3 AND tiempo de rampa de trabajo ha transcurrido AND cesta que se está fundiendo es la 1, 2 o la 3 THEN se debe usar tap 15 y curva 1.
R3	IF se está trabajando con tap 3 y curva 3 AND tiempo de rampa de trabajo ha transcurrido AND cesta que se está fundiendo es la 4 AND tiempo de operación es alto THEN se debe usar tap 15 y curva 1.
R4	IF se está trabajando con tap 3 y curva 3 AND tiempo de rampa de trabajo ha transcurrido AND cesta que se está fundiendo es la 4 AND tiempo de operación es pequeño o medio THEN se debe usar tap 17 y curva 3.
R5	IF se está trabajando con tap 15 y curva 1 AND cesta que se está fundiendo es la 3 AND tiempo de operación es pequeño AND etapa de fusión es Etapa 2 THEN se debe usar tap 17 y curva 3.
R6	IF se está trabajando con tap 17 y curva 3 AND cesta que se está fundiendo es la 4 AND etapa de fusión es Etapa 3 AND tiempo de operación es pequeño THEN se debe usar tap 19 y curva 3.

Tabla 2.4. Reglas derivadas de la base de conocimientos del subsistema “Perfil de fusión” para colada de 3 cestas.

R1	IF inicio de fusión THEN se debe usar tap 3 y curva 3.
-----------	--

Capítulo2. SACPOT-HAE: herramienta para la optimización del régimen eléctrico de un HAE.

R2	IF se está trabajando con tap 3 y curva 3 AND tiempo de rampa de trabajo ha transcurrido AND cesta que se está fundiendo es la 1 THEN se debe usar tap 15 y curva 1.
R3	IF se está trabajando con tap 3 y curva 3 AND tiempo de rampa de trabajo ha transcurrido AND cesta que se está fundiendo es la 2 o la 3 AND tiempo de operación es medio o alto THEN se debe usar tap 15 y curva 1.
R4	IF se está trabajando con tap 3 y curva 3 AND tiempo de rampa de trabajo ha transcurrido AND cesta que se está fundiendo es la 2 AND tiempo de operación es pequeño THEN se debe usar tap 17 y curva 1.
R5	IF se está trabajando con tap 3 y curva 3 AND tiempo de rampa de trabajo ha transcurrido AND cesta que se está fundiendo es la 3 AND tiempo de operación es pequeño THEN se debe usar tap 17 y curva 3.
R6	IF se está trabajando con tap 17 y curva 3 AND cesta que se está fundiendo es la 3 AND tiempo de operación es pequeño AND etapa de fusión es Etapa 3 THEN se debe usar tap 19 y curva 3.
R7	IF se está trabajando con tap 15 y curva 1 AND cesta que se está fundiendo es la 3 AND tiempo de operación es medio AND etapa de fusión es Etapa 2 THEN se debe usar tap 17 y curva 3.
R8	IF se está trabajando con tap 15 y curva 1 AND cesta que se está fundiendo es la 3 AND tiempo de operación es alto AND etapa de fusión es Etapa 2 THEN se debe usar tap 15 y curva 3.

El número de la regla no implica necesariamente el orden de su ejecución, la regla será ejecutada según el hecho que satisface el antecedente, la prominencia de la misma o el esquema de resolución de conflictos que se haya elegido.

Una característica importante del sistema experto es que se basa en estructuras de datos para la gestión de control, esto hace que si el sistema crece solo deban actualizarse estas bases sin necesidad de cambiar la lógica del sistema experto y sus reglas, esto último podría ser necesario si el cambio es muy grande e involucra algún nuevo concepto que modifique la base de conocimientos.

2.3.3. ESTABILIDAD DE ARCO ELÉCTRICO DE FASE.

Capítulo2. SACPOT-HAE: herramienta para la optimización del régimen eléctrico de un HAE.

El sistema compara los valores del índice de estabilidad de fase entre cada electrodo con el propósito de que el sistema dictamine una posible fusión no uniforme entre los tres electrodos ya sea debido a las características físicas del horno, a los diferentes tipos de chatarra, a problemas asociados al sistema de control de los electrodos.

Para el desarrollo de este subsistema del SACPOT-HAE se emplea el índice de estabilidad de fase basado en la impedancia de fase (ver epígrafe 2.2.2) el cual se considera en todas las etapas del proceso exceptuando la primera etapa debido a que las variaciones del arco que ocurren en esta son muy elevadas por lo que un comportamiento errático y diferente de cada fase es normal. De acuerdo a esto se plantea como base de conocimientos del subsistema en cuestión la tabla 2.5 de la cual se deriva la base de reglas de la tabla 2.6.

Tabla 2.5. Base de conocimientos del subsistema “Estabilidad de arco eléctrico de fase”.

C1	La uniformidad en la fusión está dada por el nivel de similitud que exista en el estado del arco eléctrico de cada fase y una diferencia significativa entre ellos representa un problema.
C2	Siempre que exista un problema en el sistema de control de los electrodos SACPOT-HAE deberá, además de advertir del problema en cuestión, sugerir posibles acciones para dar solución a este.
C3	El análisis de la uniformidad de la fusión solo se realizará en las etapas 2,3 y 4 del proceso de fusión.

Tabla 2.6. Reglas derivadas de la base de conocimientos del subsistema “Estabilidad de arco eléctrico de fase”.

R1	IF etapa de fusión no es Etapa 1 AND existe determinada diferencia entre índice de estabilidad de fase del electrodo 1, 2 o 3 con respecto a los otros 2 THEN existe problema de no uniformidad del arco eléctrico de fase 1, 2 o 3 según sea la fase diferente.
R2	IF existe problema de no uniformidad del arco eléctrico de fase 1, 2 o 3 AND esta diferencia está por debajo con respecto a los otros dos THEN notificar sobre el electrodo en cuestión AND hacer recomendaciones correspondientes a cuando existe una fase menor en

Capítulo2. SACPOT-HAE: herramienta para la optimización del régimen eléctrico de un HAE.

	cierto grado con respecto a las otras 2.
R3	IF existe problema de no uniformidad del arco eléctrico de fase 1, 2 o 3 AND esta diferencia está por encima con respecto a los otros dos THEN notificar sobre el electrodo en cuestión AND hacer recomendaciones correspondientes a cuando existe una fase mayor en cierto grado con respecto a las otras 2.

Entre las recomendaciones que se tienen concebidas que emita el sistema ante la ocurrencia de una no uniformidad del arco eléctrico durante la fusión están:

- 1- Revisar que la referencia para la regulación de los electrodos se corresponda con la que debe tener la fase que está presentando problemas.
- 2- En caso de que la referencia no sea la correcta informar para que el personal correspondiente ponga la correcta.
- 3- Si la referencia que tiene el sistema de control es la correcta entonces informar al personal correspondiente para que valore si subir o bajar la referencia en dependencia de si la no uniformidad es por debajo o por encima con respecto a las otras fases, hasta que se logre finalizar la colada.
- 4- Cuando se concluya o se interrumpa la colada revisar el cierre correcto de válvulas manuales de subir y bajar los electrodos, las ruedas guías, cero de las servoválvulas de control de los electrodos, el sistema de control en general.

2.3.4. MEDICIÓN DE TEMPERATURA Y FIN DE FUSIÓN

La temperatura alcanzada por el baño de acero es el parámetro clave para determinar el fin del proceso de fusión. En la mayoría de las industrias, por cuestiones de seguridad fundamentalmente, para tomar medidas de temperatura es preciso parar el arco y abrir la bóveda, por lo que efectuar la medición de temperatura en el momento inadecuado provoca considerables pérdidas energéticas y de tiempo de producción, con la consiguiente disminución del rendimiento energético [56] ya que:

- ✓ Si la medición se efectúa antes de alcanzar la temperatura necesaria, será preciso volver a encender el horno y realizar una medida posterior.

Capítulo 2. SACPOT-HAE: herramienta para la optimización del régimen eléctrico de un HAE.

- ✓ Si la temperatura sobrepasa la necesaria, se habrá aportado un exceso de energía.

A diferencia de la mayoría de las industrias, en Acinox Las Tunas tomar medidas de temperatura no conlleva parar el arco ni abrir la bóveda, solo subir el electrodo más cercano a donde se hace la medición. Si bien este método implica un mayor riesgo para quien lo hace también hay que aceptar que involucra menor pérdida de energía puesto que apenas se prescinde de una fase mientras dura la medición. No obstante, si se comparan los valores de consumo eléctrico obtenidos en un estudio realizado en el horno de Acinox Las Tunas durante tres últimos meses del año 2021 en coladas en las que se han realizado de una a tres mediciones con aquellos casos en los que ha sido necesario efectuar más tomas de temperatura se observa que el consumo medio aumenta considerablemente al igual que el tiempo de fusión (ver figura 2.4 y 2.5). Si bien es cierto que efectuar varias mediciones puede deberse a necesidades del proceso, como el ajuste del contenido de carbono o la disponibilidad del horno cuchara, estos casos representan únicamente el 30% de las coladas realizadas que precisaron más de 3 mediciones.

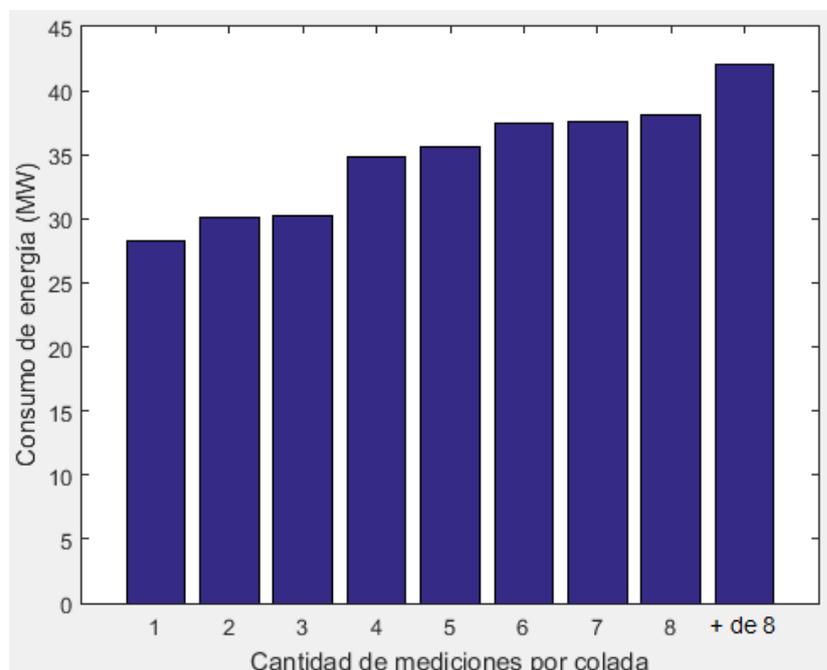


Figura 2.4. Comparativa de los consumos eléctricos promedios por colada con distintos números de mediciones de temperatura en el HAE de Acinox Las Tunas.

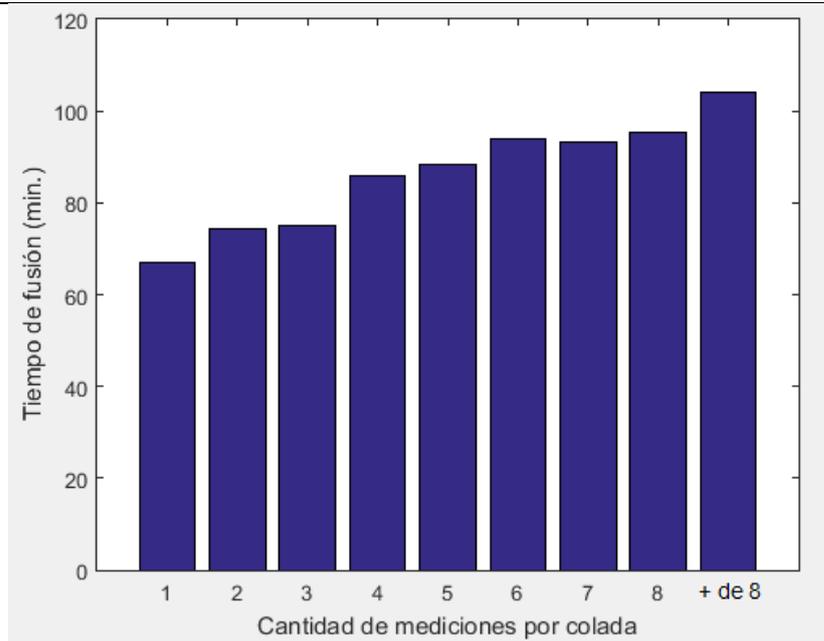


Figura 2.5. Comparativa de los tiempos de operación promedio por colada con distintos números de mediciones de temperatura en el HAE de Acinox Las Tunas.

Otro elemento que destaca negativamente es el alto porcentaje que representan las coladas en las que se realizaron más de tres mediciones (ver figura 2.6) lo cual evidencia que se efectúan mediciones en momentos inadecuados.

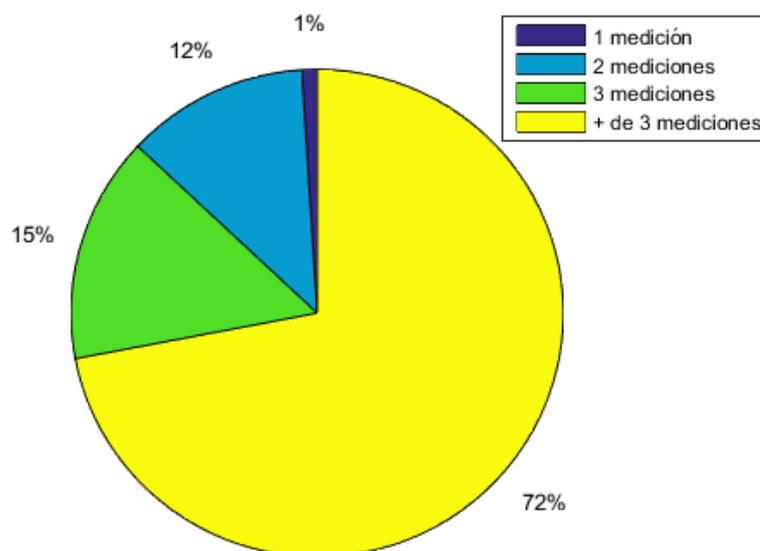


Figura 2.6. Comparativa del por ciento de coladas con distintos números de mediciones de temperatura en el HAE de Acinox Las Tunas.

Por otra parte, la realización de una única medida de temperatura sólo indica que en ese momento ya se había superado el valor necesario, por lo que un mejor ajuste supondría también una mejora del rendimiento.

Se selecciona la temperatura de colada como variable objetivo teniendo en cuenta que:

- La temperatura es el criterio que finalmente determina si una colada puede ser vertida en el horno cuchara o debe continuar en el horno de fusión.
- Una predicción online del momento indicado para medir la temperatura permitiría mejorar sensiblemente la eficiencia y productividad del proceso.

No existen muchos métodos conocidos para dictaminar el mejor momento para realizar la medición de temperatura en un HAE. De los pocos trabajos que se han podido encontrar durante la realización de la presente investigación se encuentra la propuesta de un modelo de predicción la temperatura final de una colada en hornos eléctricos de fusión [56]. Aunque este trabajo no aborda precisamente el cómo determinar el momento adecuado para realizar la medición de temperatura si es muy interesante y digno de destacar puesto que su propósito es el de predecir el valor de la temperatura del baño considerando también la experiencia de los operadores y técnicos de planta. La construcción del modelo se realiza mediante la combinación de redes neuronales y lógica borrosa y funciona básicamente de acuerdo al análisis de valores de temperatura obtenidos en diferentes coladas.

El método que se propone para lograr que el SACPOT-HAE sea capaz de inferir el mejor momento para realizar la medición de temperatura considera también la experiencia de los expertos de la planta pero a diferencia del sistema antes mencionado este basa su procesamiento en el índice de estabilidad del arco, variable que está relacionada directamente con la temperatura teniendo en cuenta que el comportamiento del arco eléctrico depende del estado de la fusión así como de la temperatura, con lo cual se puede afirmar que este índice es reflejo además de la temperatura del baño de acero. De acuerdo con esto cabe destacar que, al igual que el modelo visto en [56] el SACPOT-HAE, podría ser capaz de predecir la temperatura del baño, de manera indirecta, solo que la medición de la temperatura es necesaria,

Capítulo 2. SACPOT-HAE: herramienta para la optimización del régimen eléctrico de un HAE.

generalmente, al final de la colada por lo cual el subsistema que se ocupa de esto funcionará en la etapa concluyente.

Luego de los estudios realizados en el horno de Acinox Las Tunas y el conocimiento aportado por los especialistas se logró definir el rango de valores del índice de estabilidad del arco eléctrico a partir de los cuales es posible estimar una temperatura adecuada para terminar la colada. Este rango de valores corresponde a la Etapa 4 del proceso de fusión (ver epígrafe 2.3.1). Con estos elementos se puede plantear las reglas de este subsistema (ver tabla 2.7) el cual, en dependencia de los resultados de la medición que se realice indicará el fin de la fusión siempre que este valor sea superior a 1600 °C, valor óptimo para la empresa.

Tabla 2.7. Reglas del subsistema “Medición de temperatura y fin de fusión”.

R1	IF etapa de fusión es Etapa 4 AND cantidad de cestas de la colada es 4 AND cesta que se está fundiendo es la 4 THEN recomendar medir temperatura.
R2	IF etapa de fusión es Etapa 4 AND cantidad de cestas de la colada es 3 AND cesta que se está fundiendo es la 3 THEN recomendar medir temperatura.
R3	IF medición de temperatura es superior a <i>valor objetivo</i> THEN recomendar finalizar la fusión.

Para el caso en que el valor de temperatura obtenido sea inferior *al óptimo* lo correcto sería informar al especialista para que se tenga en cuenta en caso de que se precise ajustar el subsistema y continuar la fusión por un determinado tiempo para luego volver a medir la temperatura.

La predicción del momento idóneo para medir la temperatura y detener el proceso para verter la colada en el horno cuchara redundará en un menor consumo de termopares y lanzas de medición, un menor gasto energético y menor tiempo de procesamiento y, por tanto, una considerable mejora del rendimiento de la instalación.

2.4. VALORACIÓN DE LOS RESULTADOS ALCANZADOS

Capítulo2. SACPOT-HAE: herramienta para la optimización del régimen eléctrico de un HAE.

Para evaluar correctamente un sistema experto se requiere aplicar una metodología concreta que difiere de la típica evaluación de software, ya que la forma en que se aborda el problema y las expectativas del sistema son muy diferentes.

El objetivo de las evaluaciones es asegurar que el sistema experto ofrezca una respuesta correcta y de la forma adecuada a un problema de su dominio. Para ello es necesario:

- Asegurar la calidad del producto diseñado o desarrollado
- Asegurar su utilización en dominios críticos
- Asegurar su aceptabilidad en la rutina diaria si este ya ha sido implementado

El proceso de evaluación del sistema puede entenderse como una fase general de validación, donde se valoran aspectos del sistema tales como su utilidad, robustez, eficiencia, posibilidades de ampliación o manejo entre otros. La evaluación está formada principalmente por dos fases: la verificación y la validación.

La verificación es una comprobación de que el sistema es consistente, no tiene errores y cumple con las especificaciones iniciales. Durante el desarrollo de los prototipos será necesario comprobar por tanto la estructuración del conocimiento para garantizar que el sistema se modele tal como se especificó y esté libre de errores. Este análisis puede hacerse o no en función del dominio dependiendo de la fase que se desee verificar. También es necesario comprobar que las reglas definidas son íntegras, exactas y evitan redundancias.

La fase de validación es más compleja ya que depende del criterio con el que se evalúe el sistema y su intención de uso. Se comprueba que la salida del sistema sea correcta y se cumplen las necesidades y requisitos del usuario. Demostrar que un sistema experto es correcto es una tarea crítica, pues un sistema con errores puede provocar fallos que resultan costosos y no cumplirá con las expectativas. Para una correcta validación se debe definir el nivel o calidad de las respuestas que el sistema genere frente a las dadas por un experto. En base a ello se puede definir un rango de tolerancia del nivel de respuestas del sistema, así como la fiabilidad esperada que implicará el nivel de confianza en el sistema en base a su credibilidad.

Capítulo2. SACPOT-HAE: herramienta para la optimización del régimen eléctrico de un HAE.

La validación del sistema experto requiere los siguientes elementos para obtener una respuesta cuantitativa y cualitativa de los resultados [57]:

- Casos de prueba
- Expertos
- Sistema experto a evaluar
- Interpretación de los casos de prueba
- Validación de las interpretaciones de los casos de prueba mediante un criterio de evaluación concreto

Los casos de prueba para la validación del sistema deben ser de un número y representatividad suficiente para asegurar el correcto funcionamiento del sistema frente a problemas reales. Es más importante cubrir las casuísticas que disponer de un gran número de casos. Los casos de prueba se han de presentar al sistema experto a evaluar y al conjunto de expertos para que, independientemente, sean interpretados. Para poder analizar los resultados es necesario haber establecido un determinado criterio. Este criterio no solo debe tener en cuenta si el resultado es bueno, sino que debe poder medir cuán bueno es, su nivel de detalle, su utilidad, velocidad de respuesta, etc. Una vez establecido el criterio, se contrastan las respuestas de los expertos con las del SE. En base al criterio elegido se validan los resultados generando unos índices de acuerdo con diferentes técnicas cuantitativas de validación, que representan cuán bueno es el resultado proporcionado por el sistema experto. En la figura 2.7 puede verse una representación de la metodología descrita.

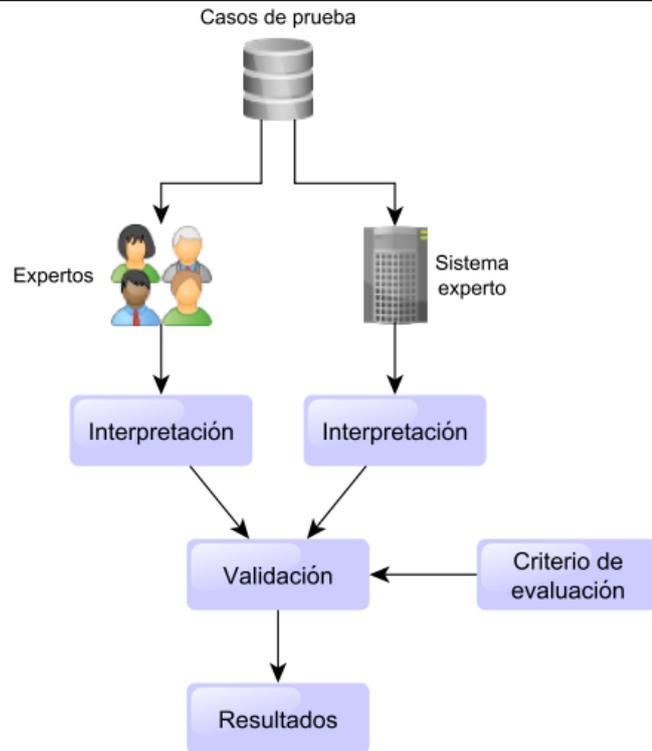


Figura 2.7. Metodología de validación del sistema experto.

De acuerdo a esto se organizó una comisión de expertos formada por dos especialistas del grupo de instrumentación, un especialista del grupo de automática, el jefe del grupo de tecnología, el jefe del área de elaboración, dos jefes de brigada del HAE de la empresa, un jefe de turno mayor, tres operadores y dos fundidores. En la tabla 2.8 se puede apreciar el nivel académico de los expertos que constituyen esta comisión.

Tabla 2.8. Nivel académico de expertos de la comisión.

Obrero	5
Técnico medio	1
Ingeniero	6
Master	1
Total	13

Capítulo 2. SACPOT-HAE: herramienta para la optimización del régimen eléctrico de un HAE.

Para poder evaluar el desempeño de las distintas funciones del SACPOT-HAE se tomaron como casos de prueba 20 coladas seleccionadas aleatoriamente en el año 2021 y el primer trimestre del 2022. Se elaboraron 5 criterios a partir de los cuales, de acuerdo con los resultados obtenidos de simulaciones previas en el software MatLab de las posibles respuestas del sistema desarrollado en las distintas situaciones y a lo que los expertos harían en esos casos, la comisión pudo entregar una valoración final acerca de la propuesta.

- ✓ Criterio 1: Evaluación del método del SACPOT-HAE para determinar las etapas del proceso.

Para poder analizar este criterio se realizaron cálculos del índice de estabilidad basado en la impedancia en cada cesta de cada colada de las 20 que fueron seleccionadas. Ejemplos de estos los encontramos en las figuras 2.8 y 2.9. Los resultados fueron muy favorables, aunque dos expertos plantearon dudas con respecto a la identificación de la primera etapa durante la fusión de algunas cestas, no obstante, en sentido general dieron, junto al resto del equipo de expertos, el visto bueno al método con que el sistema diagnostica los distintos estados del proceso.

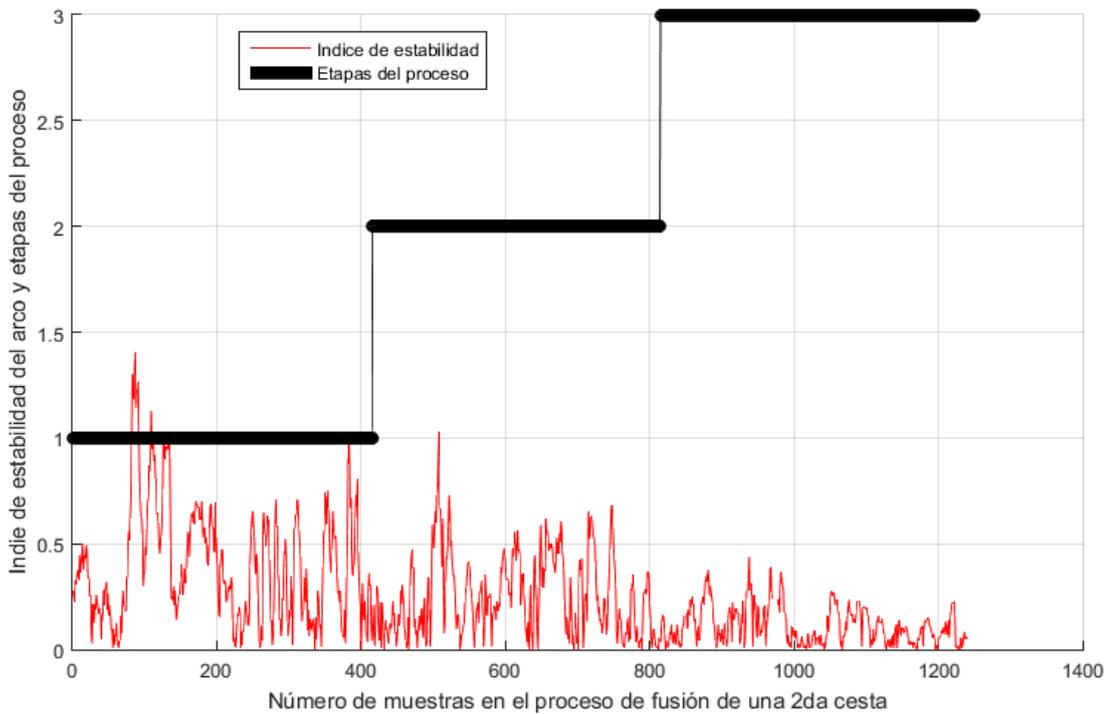


Figura 2.8. Diagnóstico de etapas del proceso de fusión de una segunda cesta.

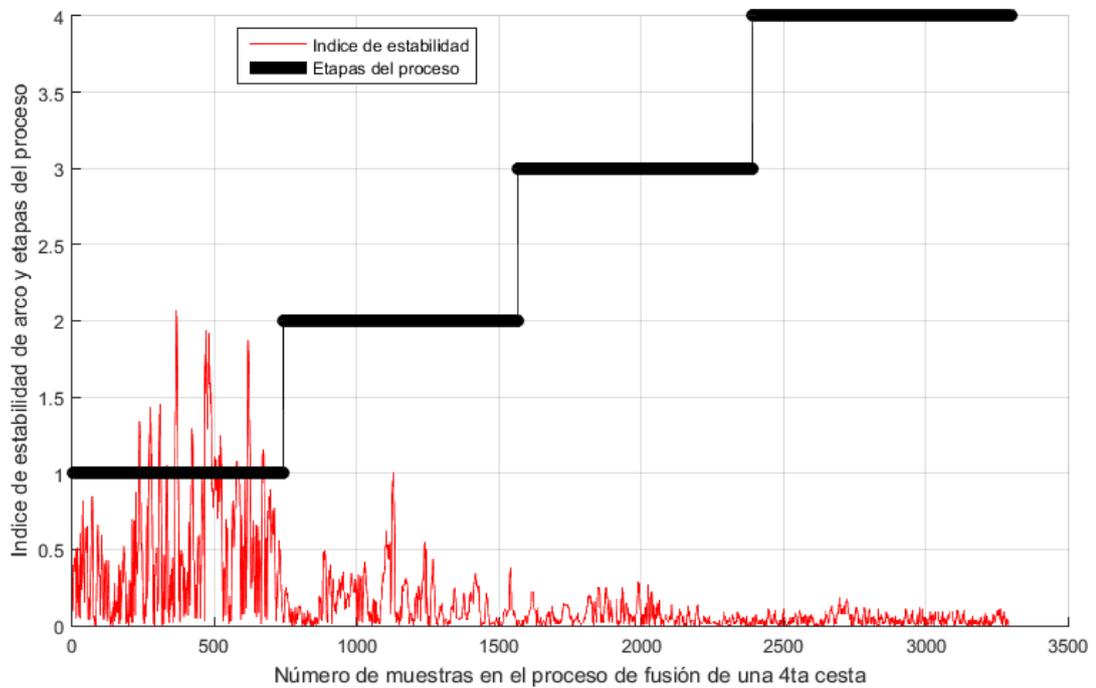


Figura 2.9. Diagnóstico de etapas del proceso de fusión de una cuarta cesta.

- ✓ Criterio 2: Calidad de los programas de fusión preconcebidos para el sistema experto.

Las figuras 2.10 y 2.11 representan algunas de las simulaciones que se realizaron para comprobar las recomendaciones que realiza el SACPOT-HAE del programa de fusión a seleccionar a medida que avanza la fusión de una cesta en dependencia de la etapa del proceso. Si bien es cierto que la mayoría de las simulaciones que se realizaron mostraron grandes similitudes durante la fusión de las primeras cestas con respecto a los usados por los operadores la mayor parte de las simulaciones en las terceras y cuartas cestas mostraron diferencias más apreciables. Sobre estas los expertos consideraron como más acertadas las recomendaciones que realiza el sistema experto para el control de potencia que los parámetros que habían determinado los operadores. En sentido general la comisión evaluadora consideró los distintos programas con que cuenta el SACPOT-HAE como minuciosos y adecuadamente seleccionados. El nivel de opinión porcentual acerca de la calidad de estos programas se puede observar en la figura 2.12.

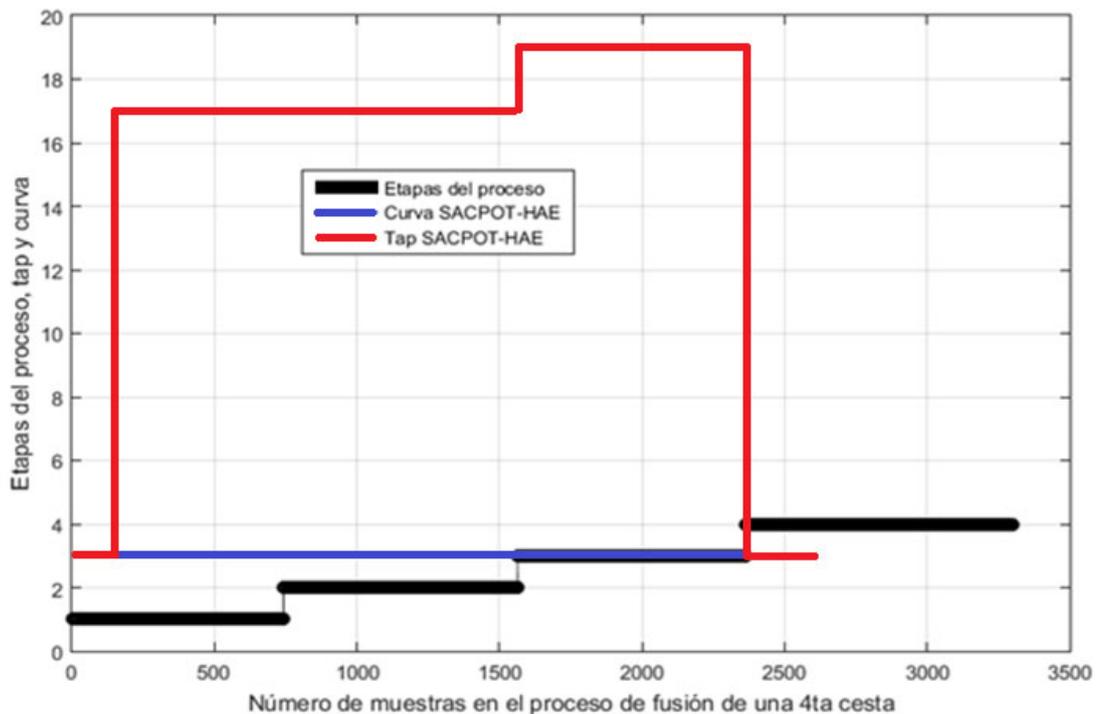


Figura 2.10. Perfil de potencia recomendado por el SE para el proceso de fusión de una cuarta cesta.

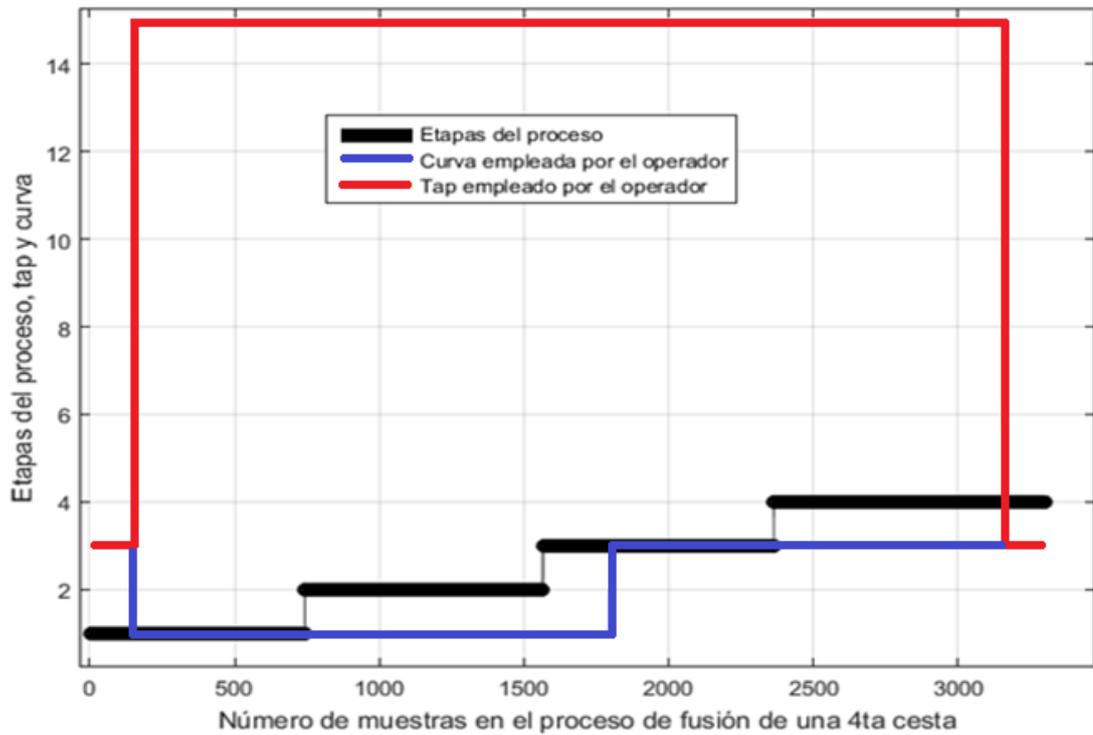


Figura 2.11. Perfil de potencia empleado por el operador para el proceso de fusión de una cuarta cesta.

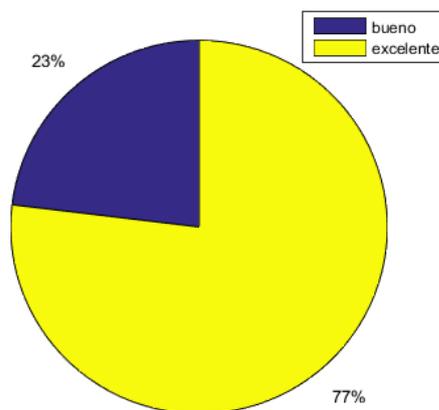


Figura 2.12. Nivel porcentual de opinión acerca de la calidad de los programas de fusión definidos en el SACPOT-HAE.

✓ Criterio 3: Diagnóstico correcto de no uniformidades en el arco eléctrico de fases. Para este caso el 100 % de los expertos ven como muy favorable la inclusión de esta función en el sistema propuesto, sin embargo, vieron como elemento negativo que el sistema no es capaz de discernir cuando la no uniformidad se debe a un problema propio del proceso o a una manipulación expresa de los electrodos por el operador consistente. No obstante, se considera que, a pesar que desde el punto de vista operativo en ocasiones es preciso subir manualmente los electrodos, esto no quita que dicha acción repercuta negativamente en el estado del arco eléctrico y por tanto en el consumo de potencia por lo que es válido que se incluya su análisis. En la siguiente imagen se muestra un ejemplo de la identificación de no uniformidades.

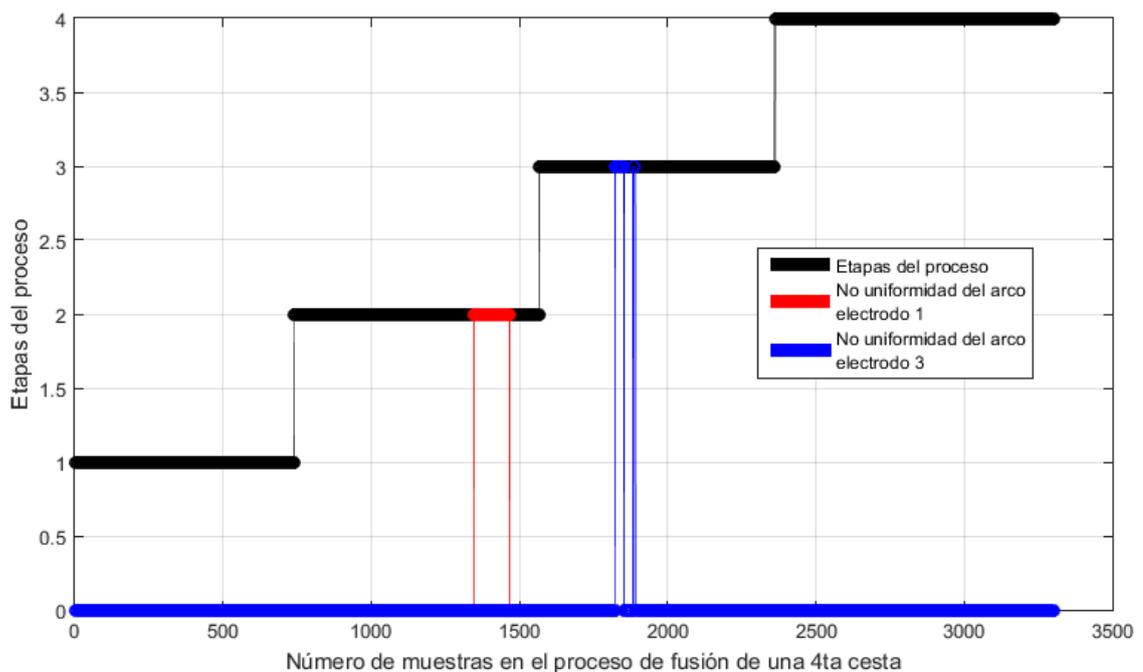


Figura 2.13. Diagnóstico de no uniformidades del arco eléctrico durante el proceso de fusión de una cuarta cesta.

La no uniformidad que presenta el arco eléctrico del electrodo 1, en este caso, se debe a que este estaba bloqueado arriba debido a una caída de presión provocada por la colisión con un elemento no metálico. Las otras dos no uniformidades reflejadas en la imagen referidas al electrodo 3 son debidas a comandos del operador de subir el electrodo en cuestión.

✓ Criterio 4: Detección del momento adecuado para medir la temperatura.

Capítulo 2. SACPOT-HAE: herramienta para la optimización del régimen eléctrico de un HAE.

Para evaluar al SE según este criterio se decidió comprobar las mediciones que se realizaron en las distintas coladas y compararlos con los momentos que recomienda el SACPOT-HAE en esas mismas coladas. Durante este ensayo se comprobó que, de las 20 coladas, en 3 de estas el momento determinado para medir la temperatura por el SE fue bastante cercano al momento real en que se obtuvo una medición superior al *valor objetivo* luego de que se hubiesen hecho de 1 a 2 mediciones anteriores (ver ejemplo en figura 2.14), en 11 ocasiones se acercó, aunque menos que en las anteriores, al momento adecuado elegido por los operarios con la diferencia que en estas coladas ya se habían hecho de 3 a 6 mediciones innecesarias (ver figura 2.15). En las restantes 6 coladas se obtuvo que el momento de medición recomendado por el SE tuvo mucha mayor antelación a los que se tomaron para realizar una medición que arrojase un resultado adecuado, y antes de esta ya se habían realizado más de 6 mediciones.

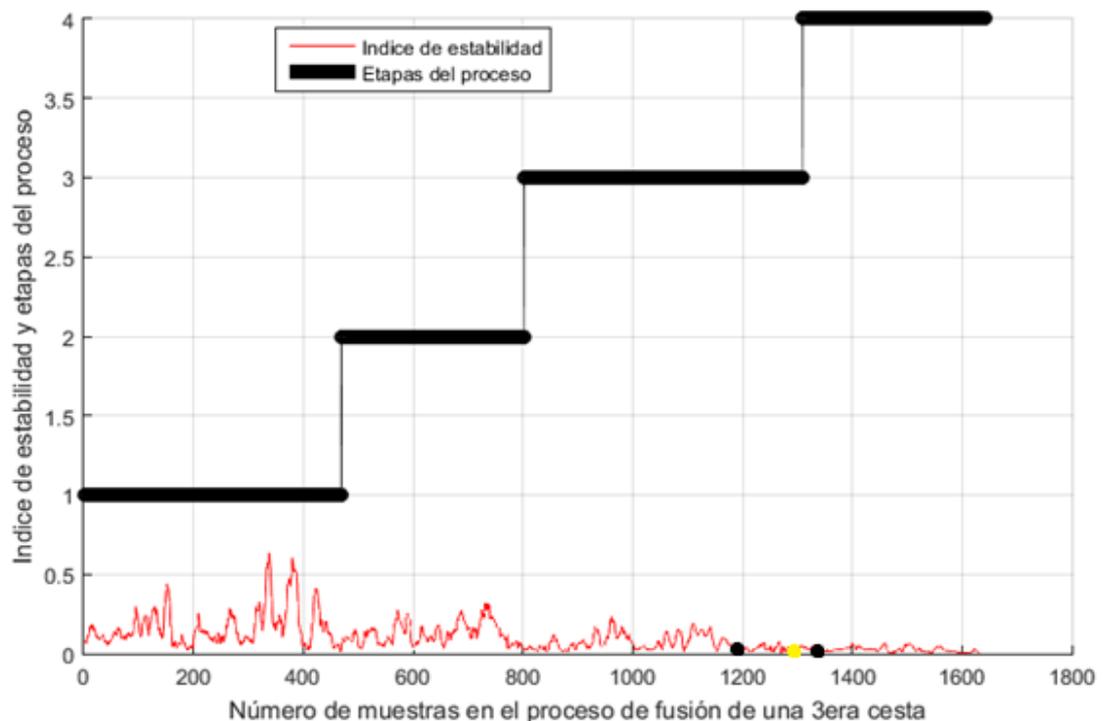


Figura 2.14. Detección del momento adecuado para medir la temperatura.

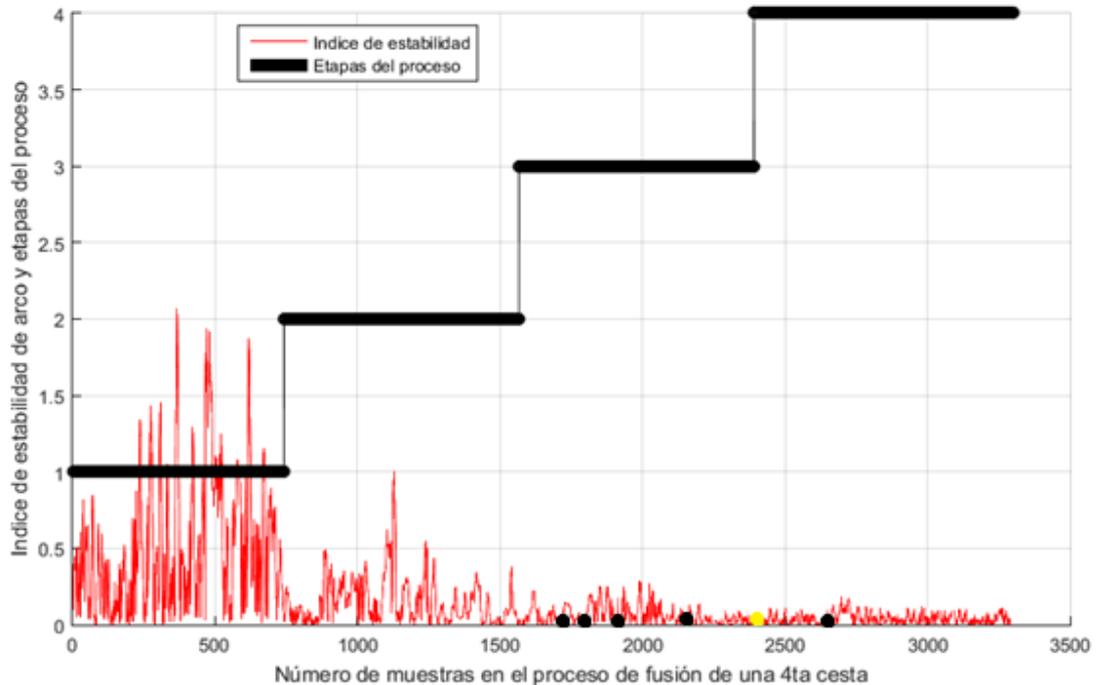


Figura 2.15. Detección del momento adecuado para medir la temperatura.

En las figuras anteriores los puntos negros marcados en el eje x de cada gráfica representan las mediciones de temperatura que se realizaron durante la fusión hasta que se lograron valores adecuados mientras que el punto amarillo representa el momento idóneo estimado por el sistema propuesto para realizar esta medición.

Por último, se evaluó la capacidad del SACPOT-HAE de determinar el momento para terminar la fusión de las cestas en dependencia del estado del arco eléctrico y la temperatura.

✓ Criterio 5: Efectividad del SACPOT-HAE para recomendar terminar la fusión.

Para el desarrollo de esta evaluación se comprobaron los distintos programas de fusión empleados con respecto a los recomendados por el SE y en correspondencia con los valores de temperatura se compararon los tiempos y consumos de las coladas reales con los valores que se hubiesen obtenido con el empleo del SACPOT-HAE. De este análisis se pudo comprobar que en el 95 % los casos las recomendaciones del sistema propuesto reflejaron menores tiempos y consumos de energía por colada que los que se precisaron en la realidad. De acuerdo a los cálculos que se pudieron hacer se constató que sí, para el desarrollo de esas 20 coladas hubiese sido posible el

Capítulo 2. SACPOT-HAE: herramienta para la optimización del régimen eléctrico de un HAE.

empleo del SE propuesto, y se hubiese podido ahorrar alrededor de 1.67 MW por colada (ver tabla 2.9).

Tabla 2.9. Comparación de la energía consumida para la fusión de coladas por operadores y por SACPOT-HAE.

Energía consumida por operadores (MW)	Energía consumida por SACPOT-HAE (MW)	Diferencia energía consumida por el SE con respecto a la empleada por operadores
34.2	32.8	+1.4
33	29.7	+3.3
35.6	33.4	+2.2
31.3	31.6	-0.3
37.5	36.2	+1.3
42.1	37.6	+4.5
32.3	31	+1.3
29.7	28.5	+1.2
34.6	33.5	+1
38.1	36.5	+1.6
34	31.9	+2.1
36.3	34.8	+1.1
34.8	33.2	+1.6
32.7	30.9	+1.8
30.7	29.8	+0.9
35.2	33.9	+1.3
38	35.6	+2.4
33.8	33	+0.8
37.1	35	+2.1
31.3	29.5	+1.8

Finalmente, el 100 % de los expertos consideraron como muy buena la propuesta en todos los aspectos y funciones que realiza, muy superior al sistema de control con que se cuenta actualmente y un complemento que sería bien recibido por la empresa puesto que consideran que, efectivamente, este sistema garantizaría sin dudas un aumento en la eficiencia del proceso de fusión en el HAE de Acinox Las Tunas.

2.4.1. ANÁLISIS VALORATIVO DE LOS ASPECTOS ECONÓMICOS Y MEDIOAMBIENTALES

La generación eléctrica en el país es fundamentalmente de carácter térmico donde los costos del combustible son elevados generando además un impacto ambiental negativo. Al minimizar el consumo de energía de un horno que representa una carga significativa para el sistema eléctrico nacional, sería posible redireccionar esta energía al resto de los consumidores, adicionalmente un menor consumo de electricidad representa una reducción de los gastos en energía de la empresa y por consiguiente del país puesto que implica una disminución de la importación de combustible para la generación de electricidad. Partiendo de la evaluación preliminar de los resultados del SACPOT-HAE, realizada por los expertos de la planta, se puede decir que esos 1.67 MW que se podrían ahorrar por cada colada que se realiza en el HAE de Acinox Las Tunas representaría un ahorro de aproximadamente 400 MW por mes suponiendo que la empresa produjera 8 coladas diarias. Con esta energía se podrían producir alrededor de 750 toneladas de acero adicionales por cada mes, lo que significaría, cerca de 9000 toneladas al año. Por otro lado, hablando en términos monetarios, dejar de consumir 400 MW por mes supondrían un ahorro de 16 millones 240 mil pesos al año, dinero que bien podría aprovecharse para pagar a los trabajadores y para invertir en mejoras en la entidad.

CONCLUSIONES

1. Inicialmente se abordaron las características generales que posee la propuesta de SE para dar solución al problema planteado en la investigación y se mencionan los elementos fundamentales que la componen.
2. Se formuló un nuevo método para la obtención de los índices de estabilidad del arco eléctrico de fase y un índice de estabilidad de arco general que

resultó ser preciso y económico con respecto a otros ya existentes y que constituye un elemento clave de la propuesta presentada.

3. Se realizó el diseño de distintos subsistemas que realizan funciones muy importantes para la optimización del control de potencia en un HAE y con las cuales no se cuenta actualmente y que deben arrojar resultados muy favorables.
4. Finalmente se logró el diseño del SACPOT-HAE, un sistema experto que sirve de ayuda en la toma de decisiones en el control de potencia del HAE de Acinox Las Tunas, brinda sus decisiones de acuerdo a las etapas del proceso de fusión. Se trata de un sistema inteligente que es capaz de comprobar la eficacia del control de los electrodos, que recomienda soluciones en caso de fallas de este último, que advierte al operador sobre cuál es el mejor momento para realizar las mediciones de temperatura del baño de acero y que indica cuando una cesta está fundida o la colada está lista.
5. Se corroboró el gran paso de avance que significa el SACPOT-HAE para el control de potencia en el horno de la empresa no solo por la versatilidad del mismo ni por lo útil de sus distintas funcionalidades sino además en las considerables mejoras que este puede ofrecer en cuanto a la eficiencia energética según las evaluaciones hechas por los principales expertos de la entidad y los resultados obtenidos en los experimentos realizados.

CONCLUSIONES

Las conclusiones generales del presente trabajo son las siguientes:

- ❖ Se hizo una caracterización profunda sobre los hornos de arco eléctrico en la actualidad.
- ❖ Se caracterizaron los sistemas de control de potencia de los hornos de arco eléctrico y se diagnosticaron y fundamentaron los problemas e insuficiencias que presentan los mismos y en particular el de Acinox Las Tunas.
- ❖ Se logró diseñar un sistema experto para el apoyo en la toma de decisiones del control de potencia en el horno de arco eléctrico de ACINOX Las Tunas.
- ❖ Se logró comprobar la validez del sistema propuesto mediante simulaciones y la valoración de un grupo representativo de expertos que laboran en la entidad.
- ❖ El sistema propuesto, llamado SACPOT-HAE, emplea una técnica de inteligencia artificial muy empleada en el campo de los sistemas de potencia en la actualidad, los sistemas expertos, lo que representa un gran paso de avance para el desarrollo e innovación en la empresa. La propuesta supone una menor carga laboral para el operador con respecto a la que posee actualmente, a lo que se sumaría a un aumento de la eficiencia de su trabajo gracias a las probadas ventajas que reportaría el empleo de la herramienta presentada.
- ❖ Se pudo comprobar que el SACPOT-HAE es capaz de mejorar la transferencia de potencia y por ende se incrementaría la eficiencia eléctrica en el horno de Acinox Las Tunas.
- ❖ Una de las principales ventajas que tiene el uso del SACPOT es que se podría ahorrar, de acuerdo a las evaluaciones preliminares realizadas por los expertos de la planta, 1.67 MW por cada colada que se realice lo cual representaría un ahorro de aproximadamente 400 MW por mes suponiendo que la empresa produjera 8 coladas diarias. Con esta energía se podrían hacer cerca de 9000 toneladas de acero al año. Hablando en términos

monetarios, dejar de consumir 400 MW por mes supondrían un ahorro de 16 millones 240 mil pesos al año.

RECOMENDACIONES

- 1- Incorporar otras funcionalidades al sistema como el análisis de los diagramas circulares de potencia y a partir de estos diagnosticar si se está trabajando dentro de los valores de potencia activa correctos.
- 2- La implementación del sistema propuesto.
- 3- Una vez que el sistema tenga un tiempo apreciable de funcionamiento estable, se recomienda diseñar un método que permita el autoajuste de los rangos de valores del índice de estabilidad de fase, que define cada etapa del proceso de fusión, de acuerdo a los resultados históricos obtenidos. Una vía prometedora para hacerlo puede ser el empleo de redes neuronales.
- 4- Como última recomendación de esta investigación proponemos que, si se logran ejecutar las sugerencias anteriores, sería conveniente que se valore la posibilidad de emplear al SACPOT-HAE como controlador automático del sistema de control de potencia del horno de Acinox Las Tunas y no solo como un sistema complementario.

BIBLIOGRAFÍA

-
- [1] I. E. Agency, "Energy Technology Perspectives 2012 -Pathways to a clean energy system," 2012.
 - [2] L. R. Jaccard, "Operation of the electric arc furnace – with examples," 1996.
 - [3] Y. Toulouevski, "Innovation in electric arc furnaces," 2013.
 - [4] B. Bowman and K. Krüger, *Arc Furnace Physics*. Düsseldorf: Stahleisen, 2011.
 - [5] J. M. Mendoza, "Fundamentos y características generales de operación de los hornos de arco eléctrico," Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú, 2006.
 - [6] G. P. Kornilov, A. A. Nikolaev, A. Y. Kovalenko, and E. A. Kuznetsov, "Means and trends of reactive power management at large ironworks," *Russian Electrical Engineering*, vol. 79, pp. 248-253, 2008.
 - [7] A. A. Nikolaev, G. P. Kornilov, A. V. Anufriev, S. V. Pekhterev, and E. V. Povelitsa, "Electrical Optimization of Superpowerful Arc Furnaces," *Steel in Translation*, vol. 44, pp. 289-297, 2014.
 - [8] A. A. Nikolaev, G. P. Kornilov, T. R. Khramshin, I. Akay, and Y. Gok, "Application of Static Var Compensator of Ultra-High Power Electric Arc Furnace for Voltage Drops Compensation in Factory Power Supply System of Metallurgical Enterprise," *Proc. Electrical Power and Energy Conference (EPEC)*, pp. 235-241, 2014.
 - [9] F. Martell Chávez and I. Y. Sánchez Chávez, "Estrategias de Control de Potencia para Incrementar la Eficiencia Energética en Hornos de Arco Eléctrico de Corriente Alterna," 2014.
 - [10] R. Sellan and M. Fabbro, "Millennium Steel," 2008.
 - [11] K. Kim, J. Jeong, B. Lee, B. Jung, and S. Kim, "Phase Stability Index of AC Furnace Arc Based on RMS and THD," *IEEE*, 2014.
 - [12] A. A. Nikolaev, P. G. Tulupov, and L. I. Antropova, "The Comparative Analysis of Electrode Control Systems of Electric Arc Furnaces and Ladle Furnaces," *2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)* pp. 1-7, 2016.
 - [13] F. Rubensucker, M. Bourge, and D. Nardacchione, "ArCOS: A new generation Arc Control Optimising System," *Steel Times International*, 2002.
 - [14] M. Piazza, F. Bianco, D. Patrizio, and M. Ometto, "EAF process optimization through a modular automation system and an adaptive control strategy," *La Metallurgia Italiana*, vol. 9, 2016.
 - [15] M. Czapla, M. Karbowniczek, and A. Michaliszyn, "The optimisation of electric energy consumption in the electric arc furnace," *Archives of Metallurgy and Materials*, vol. 53, pp. 559-565, 2008.
 - [16] L. Ghiormez and O. Prostean, "Electric Arc Current Control for an Electric Arc Furnace Based on Fuzzy Logic," *10th Jubilee IEEE International Symposium on Applied Computational Intelligence and Informatics*, 2015.
 - [17] J. Dicker, "Monitoring of slag foaming and other performance indicators in an Electric Arc Furnace," Facultad de Ciencias, Universidad de New South Wales, June, 2014.

- [18] D. Gajić, I. Savić-Gajić, I. Savić, O. Georgieva, and S. Di Gennaro, "Modelling of electrical energy consumption in an electric arc furnace using artificial neural networks," *Energy*, vol. 108, pp. 132-139, 2016.
- [19] D. Raisz, M. Sakulin, H. Renner, and Y. Tehlivets, "Recognition of the Operational States in Electric Arc Furnaces," *IEEE*, pp. 475-480, 2000.
- [20] O. Lozynskyi, R. Paranchuk, and Y. Paranchuk, "Multicriterion intelligent control system and optimal stabilization of arc steel-melting furnace electrical regimes coordinates," *Computational Problems of Electrical Engineering*, vol. 1, 2011.
- [21] S. Badaró, L. J. Ibañez, and M. J. Agüero, "Sistemas Expertos: Fundamentos, Metodologías y Aplicaciones," *Ciencia y Tecnología*, vol. 13, pp. 349-364, 2013.
- [22] T. D. Bansilal and K. Parthasarathy, "An expert system for alleviation of network overloads," *Electric Power System Research*, vol. 40, pp. 143-153, 1997.
- [23] C. Pimpa and S. Premrudeepreechacharn, "Voltage Control In Power System Using Expert System Based On SCADA System," *Proceedings of IEEE Power Engineering Society Winter Meeting*, vol. 2, pp. 1282-1286, 2002.
- [24] A. M. Azmy, "Optimal Power Flow to Manage Voltage Profiles in Interconnected Networks Using Expert Systems," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 22, pp. 1622-1628, 2007.
- [25] J. C. Vaschetti, F. Magnago, and V. H. Sauchelli, "Control Secundario de Voltaje Basado en Sistemas Expertos," presented at the Décimo Quinto Encuentro Regional Ibero-americano del CIGRÉ, Foz de Iguazú-PR, Brazil, 19-13 de mayo, 2013.
- [26] *Perfil de Fusión en Automático*, A. L. Tunas IAC-0213a, 2009.
- [27] *Instrucción para la determinación del modo de operación del Horno de Arco Eléctrico de ACINOX Las Tunas*, UNE DN-IO 0014, 2003.
- [28] Y. Saboohi, A. Fathi, I. Skrjanc, and V. Logar, "Optimization of the electric arc furnace process," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 1, 2018.
- [29] J. Astigarraga Urquiza. (1999). *Hornos de arco para fusión de Acero*.
- [30] S. Ramirez. (2003). *Calidad del servicio de energía eléctrica (Primera ed.)*.
- [31] J. Chamorro, "Estudio e implementación de técnicas en la operación de un horno de arco eléctrico para disminuir el consumo energético," Facultad de Ingeniería Mecánica, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador, 2019.
- [32] J. Mateos Carmona, "Análisis y optimización de costes en una planta de procesado y producción de acero," Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad Carlos III de Madrid, Madrid, España, 2010.
- [33] A. A. Nikolaev, P. G. Tulupov, and L. I. Antropova, "Heating Stage Diagnostics of the Electric Arc Furnace Based on the Data about Harmonic Composition of the Arc Voltage " *IEEE*, 2018.
- [34] H. Mees, J. Hohl, and K. Krüger, "Dynamic Condition-Based Scrap Melt Control: Results of the Application at Thyssenkrupp Nirosta in Bochum," in *Proc. 10th European Electric Steelmaking Conference*, Graz, 2012.
- [35] A. A. Nikolaev , P. G. Tulupov, and A. V. Anufriev, "Assessing the Feasibility of Electrical Mode Control of Ultra-High Power Arc Steelmaking Furnace Based on Data about Harmonic Composition of Arc Currents and Voltages,"

- Proceedings of 16th International Conference on Research and Education in Mechatronics (REM2015)*. IEEE, pp. 302-308, 2015.
- [36] F. Martell, "Energy Efficient Power Control of Alternate Current Electric Arc Furnaces," División de Ingeniería y Arquitectura, Campus Aguascalientes, Tecnológico de Monterrey, México, 2012.
- [37] F. Martell, A. Deschamps, R. Mendoza, M. Meléndez, A. Llamas, and O. Micheloud, "Virtual Neutral to Ground Voltage as Stability Index for Electric Arc Furnaces," *ISIJ International*, vol. 51, pp. 1846-1851, 2011.
- [38] A. Vicente, A. Picon, J. A. Arteche, M. Linares, A. Velasco, and J. A. Sainz, "Magnetic field-based arc stability sensor for electric arc furnaces," *Elsevier*, vol. 151, octubre, 2019.
- [39] S. A. Moriello, "Computación Suave: Un nuevo paradigma para la implementación de sistemas inteligentes," 2002.
- [40] B. M. Dehkordi, M. Moallem, and A. Parsapour, "Predicting foaming slag quality in electric arc furnace using power quality indices and fuzzy method," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 60, pp. 3845-3852, 2011.
- [41] Z. Hong, Y. Sheng, and J. Li, "Development of AC electric arc furnace control system based on fuzzy neural network," *Mechatronics and Automation, Proceedings of the 2006 IEEE, International Conference*, pp. 2459-2464, junio 2006.
- [42] E. Turban, "Decision Support and Expert Systems (4ta edición)," *EE.UU. Prentice-Hall*, 1995.
- [43] J. C. Vaschetti, "Control en Tiempo Real del Sistema Eléctrico de Potencia mediante técnicas de Inteligencia Artificial," Tesis Doctoral, Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina, 2013.
- [44] J. Durkin, "Expert Systems: Design and Development," ed. New Jersey, Prentice Hall, 1994.
- [45] J. Giarratano and G. Riley, "Expert Systems, principles and programming," *Course Technology, 4 Edition*, p. 842, 2004.
- [46] Y. Lee, H. Nordborg, Y. Suh, and P. Steimer, "Arc stability criteria in AC arc furnace and optimal converter topologies," presented at the Applied Power Electronics Conference (APEC), 2007.
- [47] Sellan R. and M. Fabbro, "The 300t EAF meltshop at the new Iskenderum minimill complex," *MPT International*, vol. 2, pp. 52-58, 2008.
- [48] K. J. Tseng, Y. Wang, and D. Mahinda, "An Experimentally Verified Hybrid Cassie-Mayr Electric Arc Model for Power Electronics Simulations," *IEEE Trans. Power Electronics*, vol. 12, pp. 429-436, 1997.
- [49] Y. Suh, H. Park, Y. Lee, and P. K. Steimer, "A Power Conversion System for AC Furnace With Enhanced Arc Stability," *IEEE Trans. Industry Applications*, vol. 46, pp. 2526-2535, 2010.
- [50] S. Kim, J. J. Jeong, K. Kim, J. Hyun Choi, and S. W. Kim, "Arc Stability Index Using Phase Electrical Power in AC Electric Arc Furnace," presented at the 13th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS 2013), Gwangju, Korea, Octubre 20-23, 2013.
- [51] Y. A. Mobarak, "Arc Furnance Loads Voltaje Stability," 2014.

- [52] M. A. Gomez-Martinez, A. Medina, and C. R. Fuerte-Esquivel, "AC arc furnace stability analysis based on bifurcation theory," *IEE Proc.—Gener. Transm. Distrib.*, vol. 153, pp. 463–468, 2006.
- [53] F. Martell Chávez, M. Ramírez Argáez, A. Llamas Terres, and O. Micheloud Vernack, "Theoretical Estimation of Peak Arc Power to Increase Energy Efficiency in Electric Arc Furnaces," *ISIJ International*, vol. 53, pp. 743–750, 2013.
- [54] S. M. M. Agah, S. H. Hosseinian, H. A. Abyaneh, and N. Moaddabi, "Parameter identification of arc furnace based on stochastic nature of arc length using two step optimization technique," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 25, pp. 2859–2867, 2010.
- [55] Juan Guerra Serrano, Angel Sánchez Roca, Guillermo González Yero, Mario C. Sánchez Orozco, Mercedes Pérez de la Parte, Emilio Jiménez Macías, *et al.*, "New Arc Stability Index for Industrial AC Three-Phase Electric Arc Furnaces Based on Acoustic Signals," *sensors*, vol. 20, 2020.
- [56] J. M. Mesa, M. Teresa Rodríguez, J. L. R. Vigil, and J. Villanueva, "Desarrollo de un modelo de predicción de temperatura final de colada en hornos eléctricos de fusión," 2019.
- [57] A. Curiel Robles, "Sistema experto basado en reglas para una aplicación de monitorización de producción industrial," Máster, Departamento de Sistemas Informáticos y Computación, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, septiembre 2013.

ANEXOS**PROGRAMAS DE FUSIÓN PRECONCEBIDOS PARA EL SACPOT-HAE**

Programa de fusión para colada de 4 cestas con tiempo de operación pequeño				
<i>Cesta 1</i>				
<i>Tap</i>	3	15	3	
<i>Curva</i>	3	1	3	
<i>Cesta 2</i>				
<i>Tap</i>	3	15	3	
<i>Curva</i>	3	1	3	
<i>Cesta 3</i>				
<i>Tap</i>	3	17	3	
<i>Curva</i>	3	1	3	
<i>Cesta 4</i>				
<i>Tap</i>	3	17	19	3
<i>Curva</i>	3	3	3	3

Programa de fusión para colada de 4 cestas con tiempo de operación medio			
<i>Cesta 1</i>			
<i>Tap</i>	3	15	3
<i>Curva</i>	3	1	3
<i>Cesta 2</i>			
<i>Tap</i>	3	15	3
<i>Curva</i>	3	1	3
<i>Cesta 3</i>			
<i>Tap</i>	3	15	3
<i>Curva</i>	3	1	3
<i>Cesta 4</i>			

<i>Tap</i>	3	17	3
<i>Curva</i>	3	3	3

Programa de fusión para colada de 4 cestas con tiempo de operación alto			
<i>Cesta 1</i>			
<i>Tap</i>	3	15	3
<i>Curva</i>	3	1	3
<i>Cesta 2</i>			
<i>Tap</i>	3	15	3
<i>Curva</i>	3	1	3
<i>Cesta 3</i>			
<i>Tap</i>	3	15	3
<i>Curva</i>	3	1	3
<i>Cesta 4</i>			
<i>Tap</i>	3	15	3
<i>Curva</i>	3	1	3

Programa de fusión para colada de 3 cestas con tiempo de operación pequeño				
<i>Cesta 1</i>				
<i>Tap</i>	3	15	3	
<i>Curva</i>	3	1	3	
<i>Cesta 2</i>				
<i>Tap</i>	3	17	3	
<i>Curva</i>	3	1	3	
<i>Cesta 3</i>				
<i>Tap</i>	3	17	19	3
<i>Curva</i>	3	3	3	3

Programa de fusión para colada de 3 cestas con tiempo de operación medio				
<i>Cesta 1</i>				
<i>Tap</i>	3	15	3	
<i>Curva</i>	3	1	3	
<i>Cesta 2</i>				
<i>Tap</i>	3	15	3	
<i>Curva</i>	3	1	3	
<i>Cesta 3</i>				
<i>Tap</i>	3	15	17	3
<i>Curva</i>	3	1	3	3

Programa de fusión para colada de 3 cestas con tiempo de operación alto				
<i>Cesta 1</i>				
<i>Tap</i>	3	15	3	
<i>Curva</i>	3	1	3	
<i>Cesta 2</i>				
<i>Tap</i>	3	15	3	
<i>Curva</i>	3	1	3	
<i>Cesta 3</i>				
<i>Tap</i>	3	15	15	3
<i>Curva</i>	3	1	3	3

PROGRAMACIÓN DE FUNCIÓN DE CÁLCULO DE LOS ÍNDICES DE ESTABILIDAD DE ARCO ELÉCTRICO DE FASE Y DEL ÍNDICE DE ESTABILIDAD GENERAL EN MATLAB

```
function [indicegeneral, indicefase1, indicefase2, indicefase3] =
indice_impedancia(impedanciafase1, setimpedanciafase1, impedanciafase2,
setimpedanciafase2, impedanciafase3, setimpedanciafase3, n)
```

```
k1=1;
k2=k1+n;
for i=1:length(impedanciafase1)-n
media(i)=mean(impedanciafase1 (k1:k2));
set1(i)=mean(setimpedanciafase1 (k1:k2));
desvset1(i)=sqrt((media(i)-set1(i)).^2/(n-1));
media2(i)=mean(impedanciafase2(k1:k2));
set2(i)=mean(setimpedanciafase2 (k1:k2));
desvset2(i)=sqrt((media2(i)-set2(i)).^2/(n-1));
media2(i)=mean(impedanciafase2(k1:k2));
set2(i)=mean(setimpedanciafase2 (k1:k2));
desvset2(i)=sqrt((media2(i)-set2(i)).^2/(n-1));
k1=k1+1;
k2=k1+n;
end
plot (desvset1)
grid on
hold on
plot (desvset2)
hold on
plot (desvset3)
for i=1:length(desvset1)
var=[desvset1(i),desvset2(i),desvset3(i)];
maximo(i)=max(var);
end
indicegeneral=maximo;
indicefase1=desvset1;
indicefase2=desvset2;
indicefase3=desvset3;

end
```