



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

Autora: Ing. Dannayis Antúnez González

Tutores: Dr. Angel Sánchez Roca

Dr. Guillermo González Yero

MSc. Luisa Villafruela Loperena

Santiago de Cuba

2022

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

Título: Índices de ayuda a la toma de decisiones en un
Horno de Arco Eléctrico.

Tutores: Dr. Angel Sánchez Roca

Dr. Guillermo González Yero

MSc. Luisa Villafruela Loperena

Pensamientos

En cuestiones de ciencia, la autoridad de miles no vale más que el humilde razonamiento de un único individuo.

Galileo

Dedicatoria

A mis padres Catalina y Bernardo.

A mi hermana Danay.

Agradecimientos

A mis padres por todo su amor, esfuerzo, y apoyo incondicional. Gracias por su educación y valores.
A mí querida hermana porque sé que soy su persona favorita. Gracias por estar siempre pendiente de mí y de todo lo que necesito.

A mi novio Omar. Amor, muchas gracias por todo el cariño y el apoyo que siempre me das. Por darme fuerzas cuando más las necesito. Por tu compañía y comprensión.

A mi tutor Guillermo. A usted mi eterno agradecimiento. Por varias razones. Por la oportunidad de formar parte del proyecto y de mi superación profesional. Por su ayuda, dedicación y entrega con cada uno de los maestrantes. Por sus buenos consejos que me servirán a lo largo de mi vida profesional y personal. Por su forma especial de ser, de creer y de tratar a todas las personas.

A mi tutor Ángel. Gracias por su colaboración. Por su apoyo con el equipamiento para los experimentos y su esfuerzo físico para realizarlos en condiciones extremas. Por toda su ayuda y buenos consejos.

A la dirección de la empresa CEDAI por darme la oportunidad de superarme profesionalmente.

A mis compañeras y compañeros de trabajo por apoyarme y desearme lo mejor.

A Juan. Gracias por toda tu ayuda y disposición siempre que te necesito.

A Moreno. Gracias por toda tu ayuda y sobre todo, por tu linda amistad.

A Vladimir de la Cruz. Muchas gracias por compartir sus experiencias y conocimientos. Por ayudarme a esclarecer todas mis dudas y preocupaciones. Por sus consejos y su amistad.

A Ángel Paredes y Vladimir Morera. Gracias por la ayuda brindada.

A todo el claustro de profesores de la maestría por los conocimientos brindados.

Al Grupo Técnico, Integrado de Gestión y Automático de ACINOX Las Tunas por la ayuda brindada.

A todos los amigos y amigas que siempre estuvieron al tanto y me apoyaron a seguir.

A todas las personas que colaboraron de una forma u otra.

Resumen

Actualmente en ACINOX Las Tunas la toma de decisión de los procesos de fundición de la cesta y de mantenimiento del refractario en el HAE la realiza el operador basado en su criterio y propia experiencia. Cada operador tiene criterios diferentes lo que provoca que no siempre sean exactos y eficientes a la hora de decidir el momento ideal para realizar los procesos antes mencionados. En este trabajo se propone la obtención de índices que permitan la toma de decisiones del momento ideal de cesta fundida y de mantenimiento del refractario en el Horno de Arco Eléctrico (HAE) de ACINOX Las Tunas, a partir del análisis de variables medidas en el proceso. En este trabajo se propone la obtención de índices que permitan la toma de decisiones del momento ideal de cesta fundida y de mantenimiento del refractario en el Horno de Arco Eléctrico (HAE) de ACINOX Las Tunas, a partir del análisis de variables medidas en el proceso. Para la obtención del índice de cesta fundida se tienen en cuenta el número y peso de la cesta por colada, la energía total consumida y las mediciones de ruido para la obtención de un nuevo índice de estabilidad del arco eléctrico. El índice del mantenimiento del refractario, se obtiene a partir de las mediciones de la variación de la temperatura en las paredes y el fondo del HAE. Una vez procesados los conjuntos de datos, en el caso del proceso del mantenimiento del refractario mediante el análisis de imágenes infrarrojas y en el caso del proceso de fundición de la cesta mediante el Editor de Sistemas de Inferencia Difusa, se obtuvieron los índices del desgaste del refractario y de cesta fundida. Los resultados demuestran que los índices obtenidos permiten decidir el momento ideal en que la cesta está fundida evitando parte de las pérdidas de energía en la acería y la detección del desgaste del refractario para realizar el mantenimiento del mismo en el tiempo óptimo, evitando pérdidas económicas por los elevados costos de estos componentes y operaciones.

Abstract

Currently in ACINOX Las Tunas the decision making of the basket melting and refractory maintenance processes in the Electric Arc Furnace is made by the operator based on his own criteria and experience. Each operator has different criteria which causes that they are not always accurate and efficient when deciding the ideal time to perform the above-mentioned processes. In this work it is proposed the obtaining of indexes that allow the decision making of the ideal moment of molten basket and refractory maintenance in the HAE, from the analysis of variables measured in the process. To obtain the molten basket index, the number and weight of the basket per casting, the total energy consumed and the noise measurements are taken into account to obtain a new electric arc stability index. The refractory maintenance index is obtained from the temperature variation measurements on the walls and bottom of the HAE. Once the data sets were processed, in the case of the refractory maintenance process using infrared image analysis and in the case of the basket melting process using the Fuzzy Inference System Editor, the refractory wear and basket melting indexes were obtained. The results show that the obtained indexes allow to decide the ideal moment in which the basket is melted avoiding part of the energy losses in the steel plant and the detection of the refractory wear to carry out the maintenance of the same in the optimal time, avoiding economic losses due to the high costs of these components and operations.

Índice

Introducción.....	1
Capítulo 1. Fundamentos teóricos para la obtención de índices de ayuda a la toma de decisiones en Hornos de Arco Eléctrico.....	9
1.1. Descripción del proceso en Hornos de Arco Eléctrico	9
1.1.1. Proceso de fundición de la cesta en Hornos de Arco Eléctrico	11
1.1.2. Proceso de mantenimiento del refractario en Hornos de Arco Eléctrico	13
1.2. Índice de ayuda a la toma de decisiones en el proceso de fundición de la cesta en hornos de arco eléctrico	16
1.3. Índice de ayuda a la toma de decisiones en el proceso de mantenimiento del refractario en hornos de arco eléctrico	21
1.4. Caracterización del comportamiento del desgaste del refractario y la fundición de la cesta en Hornos de Arco Eléctrico	29
1.5. Lógica borrosa. Aspectos generales	30
1.5.1. Conjuntos borrosos y funciones de pertenencia	32
1.5.2. Sistemas borrosos tipo Takagi-Sugeno –Kang (TSK).....	34
Conclusiones Parciales.....	36
Capítulo 2. Materiales, Métodos y Análisis de los Resultados	38
2.1. Materiales, Métodos	38
2.2. Selección de las variables del Sistema Difuso para determinar ICF	44
2.3. Identificación, recopilación y procesamiento de los datos	48
2.4. Modelado y simulación de los sistemas difusos	52
2.4.1. Selección de los Universos de Discursos y Subconjuntos Difusos	54
2.4. 2. Diseño de la base de reglas	57
2.4.3. Modelo Simulink del Sistema FIS Propuesto	59
2.5. Análisis de los Resultados	60
2.5.1. Resultados para la obtención del Índice de Desgaste del Refractario	60
2.5.2. Resultados para la obtención del Índice de Cesta Fundida	66

Conclusiones.....	72
Recomendaciones	73
Bibliografía	74
Anexos	80

Lista de Acrónimos:

HAE: Horno de Arco Eléctrico.

CD: Corriente Directa.

CA: Corriente Alterna.

RE: Índice Erosión Refractaria.

P_{ARC} : Potencia Activa.

L_{ARC} : Longitud del Arco.

U_{ARC} : Voltaje del Arco.

APO: Optimización Automatizada de Procesos.

RWI: Índice de Desgaste Refractario.

I_{ARC} : Corriente del Arco.

r: Distancia entre el arco y la pared del horno.

TSK: Takagi – Sugeno – Kang.

TS: Takagi – Sugeno.

HMI: Interfaz Hombre – Máquina.

SCADA: Supervisión, Control y Adquisición de Datos.

O_2 : Oxígeno Gaseoso.

E_q : Energía Química.

I_O : Inyección de Oxígeno.

E_{TC} : Energía Total Consumida.

E_E : Energía Eléctrica.

$EAESI_{HAE}$: Índice de Estabilidad del Arco Eléctrico basado en la señal acústica.

Z_1 : Impedancia del Arco, fase 1.

Z_2 : Impedancia del Arco, fase 2.

Z_3 : Impedancia del Arco, fase 3.

N_C : Número de la Cesta.

P_C : Peso de la Cesta.

I_{CF} : Índice de Cesta Fundida.

Lista de Tablas:

Tabla 1: Características de los elementos del HAE de ACINOX Las Tunas.

Tabla 2: Resumen bibliográfico para determinar cuando la cesta esta fundida.

Tabla 3: Resumen bibliográfico para detectar el desgaste del refractario.

Tabla 4: Características de la cámara FLIRA6xx.

Tabla 5: Principales datos de los experimentos.

Tabla 6: Fases que inciden en cada una de las zonas estudiadas en el HAE de ACINOX Las Tunas.

Tabla 7: Variable de entrada al Editor de Sistemas Difusos.

Tabla 8: Variable de salida al Editor de Sistemas Difusos.

Tabla 9: Datos de las coladas de los experimentos.

Tabla 10: Datos de las variables de la fórmula del índice RE.

Tabla 11: Datos de las variables de la fórmula del índice RWI.

Tabla 12: Universos de discursos y Subconjuntos Borrosos: a) FIS ICF Primeras Cestas y b) FIS ICF Última Cesta.

Tabla 13: Base de Reglas para FIS ICF Primeras Cestas.

Tabla 14: Base de Reglas para FIS ICF Última Cesta.

Tabla 15: Distribución de las temperaturas promedios por zonas.

Tabla 16: Índice de Erosión Refractaria (RE)

Tabla 17: Índice de Desgaste del Refractario (RWI)

Lista de Figuras:

Figura 1: Foto tomada al HAE de ACINOX Las Tunas.

Figura 2: Distribución de ladrillos en el HAE de ACINOX Las Tunas.

Figura 3: Ejemplos de funciones de pertenencias.

Figura 4: Fotos tomadas a los laterales de un nuevo HAE de ACINOX Las Tunas: a) Lateral derecho (Fase 1 y 3), b) Lateral izquierdo (Fase 1 y 2).

Figura 5: Fotos tomadas a las paredes desgastadas del HAE de ACINOX Las Tunas antes de iniciar el mantenimiento del refractario: a) Lateral derecho (Fase 1), b) Lateral izquierdo (Fase 2) y c) Lateral derecho (Fase 3).

Figura 6: Instalación del equipamiento para los experimentos.

Figura 7: Diagrama en bloque del análisis de las imágenes infrarrojas para determinar un índice de desgaste del refractario.

Figura 8: Evolución de las temperaturas en las paredes del HAE: a) Horno con 13 coladas y b) Horno con 158 coladas.

Figura 9: Diagrama en bloques del sistema de inferencia borroso (FIS) para determinar el índice de Cesta Fundida.

Figura 10: FIS ICF Primeras Cestas.

Figura 11: FIS ICF Última Cesta.

Figura 12: Subconjuntos borrosos para FIS ICF Primeras Cestas: a) Variable de entrada ICE y b) Variable de entrada AESI.

Figura 13: Subconjuntos borrosos para FIS ICF Última Cesta: a) Variable de entrada ICE y b) Variable de entrada AESI.

Figura 14: Conjunto de reglas para determinar ICF.

Figura 15: Modelo Simulink de los diseños experimentales.

Figura 16: Influencia del número de coladas en las variaciones de la temperatura de pared exterior del HAE.

Figura 17: Diferencia de temperaturas en las paredes externas del HAE para inicio y fin de experimentación.

Figura 18: Fotos tomadas a los ladrillos de la pared del HAE: a) Zona 1(Fase 2): 50mm, b) Zona 2(Fase 1): 70mm, c) Zona 3(Fase 1): 80mm y e) Zona 4(Fase 3): 90mm.

Figura 19: Correlación del desgaste del ladrillo refractario y las temperaturas IR.

Introducción

La producción de aceros de alta calidad a bajo costo requiere de procesos estandarizados y reproducibles. Las soluciones avanzadas en automatización ayudan a organizar y controlar la producción y proveen estrategias de optimización con relación a los costos y tiempos. Muchas decisiones dependen de condiciones y reglas y pueden por lo tanto ser tomadas de manera autónoma por el sistema de automatización, reduciendo el número de actividades que lleva a cabo el operador.[1]

Ya se manejan las soluciones de automatización para cada etapa del proceso en la acería; el desafío futuro es integrarlas totalmente. [2]

Se está iniciando una cuarta revolución industrial. Esta cuarta revolución se basa en los sistemas ciber físicos. La denominación Industria 4.0 responde específicamente a una iniciativa del gobierno alemán para mantener el liderazgo de su industria, que comenzó a elaborarse en el año 2011. [3] Industria 4.0 sería ni más ni menos que un concepto inteligente para implementar algunas tecnologías nuevas de una vez, derivando más beneficios de ellas al combinar en unas modalidades concebidas en los últimos 15 años. De hecho, esta es una gran diferencia con la forma en que se hacen usualmente los avances en la ciencia y la industria, que suelen suceder en pasos muy pequeños. [1]

A título de ejemplo, un Horno de Arco Eléctrico (HAE) debería ser capaz de detectar las condiciones mecánicas y eléctricas del equipamiento; detectar la calidad de la materia prima y consumibles (chatarra, oxígeno, gas, electrodos, ferroaleaciones, refractarios, etc.); comunicarse con las actividades aguas arriba (patio de chatarra, logística, etc.); comunicarse con las actividades aguas abajo (horno cuchara, colada continua, laminación, logística, etc.); comunicarse con todos los servicios (proveedor de gas, proveedor de energía eléctrica, departamento de compras, planeamiento de la producción, etc.); y realizar la lectura de todos sus sensores de campo. [1]

Este conjunto de información podría usarse para analizar el estado de la planta en cada momento y predecir situaciones que puedan aparecer en el futuro. Estos datos pueden luego ser usados por el sistema para decidir el momento ideal para iniciar la colada, recargar la cesta, tomar muestras, hacer el

sangrado, etcétera; decidir el momento ideal para reemplazar un electrodo gastado; y decidir el momento ideal de la parada del horno para mantenimiento. El operador asumiría el rol de un supervisor que observa si el equipamiento funciona correctamente, y su intervención sólo sería necesaria ante un mal funcionamiento general del sistema. [1]

Anomalías de producción tales como problemas eléctricos o mecánicos serían manejados por el equipamiento Industria 4.0 detectando la situación, parando el horno, informando a todos los otros equipos de la planta sobre la demora esperada, y llamando al equipo de mantenimiento con un informe detallado sobre el problema y el trabajo de reparación requerido. Identificando primeramente los repuestos necesarios, instantáneamente el departamento de logística recibe el pedido de tomar los repuestos del almacén y llevarlos a la planta. Luego del incidente, los repuestos consumidos se ordenarían automáticamente a los proveedores, para que la planta esté preparada para futuras necesidades. [1]

El monitoreo continuo de la calidad de todas las materias primas permite retroalimentar a los proveedores de forma de mantener un nivel de calidad constante. El proceso en sí se controla por una variedad de modelos de proceso que son adaptados continuamente a las demandas del material producido y las condiciones en que se encuentra el equipamiento. Por otra parte, el horno actúa como un proveedor de servicios para otros equipamientos y reacciona a demandas especiales. De ser así, el nivel de eficiencia máximo devendría en un rasgo de rutina de la operación diaria de la planta [1]

En los últimos años el porcentaje de acero por la vía horno eléctrico ha disminuido (no así la cantidad total). Pero en la medida que en China y otros países emergentes comience a haber más disponibilidad de chatarra, y en el marco de que las emisiones de CO₂ de esos países comiencen a restringirse, resulta lógico esperar un incremento de la producción por esta vía. La Agencia Internacional de la 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%. [4]

Esto plantea un desafío al desarrollo de tecnologías en este campo, para aumentar la eficiencia térmica del horno eléctrico, incrementar su productividad, disminuir su costo operativo y mejorar su desempeño ambiental. [5]

Teniendo en cuenta las nuevas políticas del país de desarrollo económico a partir del ahorro y mejor utilización de los recursos, un previo conocimiento del estado de los refractarios en el HAE evitaría costosas averías que se han producido por errores en la toma de decisiones y no planificación en tiempo de mantenimientos preventivos. Cada proceso de carga de la cesta en los HAE aumenta el consumo total de energía debido a las pérdidas que se asocian al cierre y la apertura del horno y la bóveda. Conocer el momento ideal de realizar esta operación contribuiría a disminuir estas pérdidas.

Precisamente, se estima que la realización de una investigación que aporte índices de ayuda a la toma de decisiones para el mantenimiento del refractario y determinación del momento ideal de fundida de la cesta en el HAE de ACINOX Las Tunas podría contribuir directamente al ahorro de energía, a mejorar los índices de consumo de refractarios y electrodos y a la humanización del trabajo. Lo anterior tiene mayor relevancia si se conoce que esta Acería constituye la mayor consumidora de energía en el territorio y que en Cuba no existen antecedentes de un estudio similar.

En el pasado, se realizaron varios intentos para predecir el desgaste del refractario y utilizar la predicción para sincronizar los ciclos del refractario con las paradas de producción planificadas. Uno de los ejemplos más populares es la Fórmula de Nagoya [6] para el desgaste del convertidor, desarrollada a finales del siglo XX, que vincula el desgaste y los datos del proceso de fabricación de acero mediante el uso de conocimientos especializados para seleccionar y ponderar los factores que influyen. Incluso hoy en día, el tiempo y la necesidad de mantenimiento están definidos por la experiencia y la evaluación humanas, a veces apoyado por medición láser que muestra el espesor residual del revestimiento. Sin embargo, en la mayoría de las plantas de acero, los ciclos de mantenimiento del refractario siguen una rutina relativamente estricta porque la previsibilidad de la vida útil del revestimiento sigue siendo insatisfactoria. El desafío es poder cambiar esta rutina basada en el conocimiento de los hechos. [7]

La tecnología de medición de distancia por láser de tiempo de vuelo pulsado ha sido un tema de investigación importante en la Universidad de Oulu desde principios de la década de 1980 [8-10] junto con VTT Electronics y empresas derivadas, el equipo de investigación ha estado aplicando tecnología de medición de distancia para la construcción de medidores de coordenadas ópticas de rango de ángulo-ángulo (AAR) [11, 12], que se están utilizando al menos para el monitoreo del revestimiento refractario[13] Un perfilador láser, por ejemplo, se puede preprogramar para realizar secuencias de medición

automáticamente apuntando a los límites del área de escaneo. Un sistema de medición de coordenadas ópticas basado en un telémetro láser utilizado para monitorear el desgaste del revestimiento refractario en las acerías ha sido equipado con un sistema de visión para mejorar sus características operativas y de rendimiento. La forma 3D del revestimiento refractario se mide después de la renovación al comienzo de una campaña y estos datos se almacenan como referencia. [14]

Durante la campaña, se mide el revestimiento y se comparan los resultados con los datos de referencia para minimizar los riesgos y optimizar la vida del revestimiento. Para que los resultados medidos en diferentes momentos sean comparables, deben transformarse de manera precisa y confiable en el mismo sistema de coordenadas. Esto hace que la fase de configuración del sistema de coordenadas sea crítica para el éxito del control del desgaste del revestimiento. Las pruebas provisionales en una acería resultaron prometedoras, y se está desarrollando aún más el sistema de visión. [14]

El sistema de recuperación de calor depende en gran medida del rendimiento del revestimiento refractario, ya que el aislamiento proporcionado se encarga de minimizar el intercambio de calor con la atmósfera. Por lo tanto, en caso de daño refractario, el aislamiento falla, lo que resulta en un aumento del consumo de energía y una posible escalada de problemas estructurales. Las grietas menores pueden provocar graves problemas estructurales en el revestimiento refractario, y si tales problemas no se identifican en la etapa inicial, pueden resultar en colapso estructural del horno, provocando la reducción del ciclo de vida del horno. La condición del revestimiento refractario es el indicador principal para determinar la hora exacta y la duración de las paradas importantes. El monitoreo del estado del revestimiento refractario es crucial para evitar problemas, así como un colapso estructural. Además, la aplicación de medidas correctas para evitar eficazmente tales problemas podría conducir a una extensión del ciclo de vida del horno. [15]

La termografía infrarroja es una herramienta de mantenimiento preventivo y predictivo, que se presenta como un instrumento prometedor para el monitoreo de condición rápido y confiable, entre otras técnicas de inspección y ensayos no destructivos disponibles. [16]

Sin embargo, en la mayoría de las plantas de acero, los ciclos de mantenimiento del refractario siguen una rutina relativamente estricta porque la previsibilidad de la vida útil del revestimiento sigue siendo insatisfactoria. [7]

Durante los últimos diez años el mundo siderúrgico ha experimentado muchos cambios en las prácticas de operación y la utilización de nuevos conceptos de procesos en un intento de mejorar los costos operativos y mejorar la calidad de los productos. Además, se han presentado nuevas alternativas de bajo

costo para la fusión convencional de HAE de CA. Algunos de los objetivos específicos de estos procesos incluyen la reducción de los costes específicos de capital, aumentar la productividad y mejorar la flexibilidad del proceso.

Todos estos procesos comparten una o varias de las siguientes características en común. La energía del gas de salida se utiliza para precalentar la chatarra. El carbón se añade al horno para más tarde quemarlo con el oxígeno inyectado y con ello suministrar energía al proceso. Se hace un intento para quemar el CO generado en el proceso para maximizar la recuperación de energía. Se hace un intento para maximizar el tiempo de horno conectado y reducir al mínimo el tiempo de restablecimiento.

La chatarra es y continuará siendo el principal componente de la carga metálica de los hornos eléctricos. Su preparación previa tiene incidencia en la eficiencia del horno eléctrico, y particularmente sobre los consumos específicos de energía, cal, electrodos y refractarios, así como también en el rendimiento metálico. En este sentido se continúan incorporando equipos de fragmentación de chatarra y de prensado, tanto en la siderurgia como en empresas procesadoras de chatarra. [17]

Un benchmarking de 150 hornos eléctricos de arco permite evaluar la influencia de las materias primas y su estado sobre el consumo específico de energía eléctrica. Los hornos que cargan porcentajes importantes de arrabio líquido son los que tienen los menores consumos. Le siguen los hornos que cargan arrabio sólido, junto con los mejores hornos que cargan alto porcentaje de chatarra. En una franja intermedia se ubican hornos que cargan alto porcentaje de chatarra y hornos con carga caliente de hierro esponja. Tienen consumos más elevados los hornos con alto porcentaje de chatarra de menor performance y luego se ubican los hornos que cargan hierro esponja a temperatura ambiente [18]

En la actualidad se están difundiendo conceptos de hornos con precalentamiento que superarían la performance en materia de recuperación de energía y bajo consumo específico de los actuales. Uno de ellos se conoce como "Consteel evolution", y se caracteriza por el uso de quemadores en el túnel de precalentamiento de la chatarra e inyectores para post combustión en el horno. En el nuevo sistema, el túnel de precalentamiento estaría dividido en dos secciones. La primera tendría quemadores de alta eficiencia montados cerca de la carga que pasa por debajo y estará localizada aguas arriba de la succión de gas. En la segunda sección se completa la combustión del gas de escape del horno. Se le asignaría un tamaño que permita bajar la velocidad del gas proveniente del horno, dando tiempo para que se completen las reacciones de post combustión y la separación del polvo, cuya parte más gruesa sería atrapada por la carga y se reciclaría al horno [19]

El otro concepto se conoce bajo la denominación de "Simetal EAF Quantum". Es una extensión de la idea básica del "shaft furnace", en la que se opta por la carga de la cuba mediante un carro elevador y un chute, eliminando cestas y grúa. Para eliminar el tiempo con horno desconectado utiliza un sistema de sifón para el sangrado. [19]

Las principales diferencias con la anterior generación de hornos con cuba son, de acuerdo a quienes lo proponen, las siguientes: [20]

- Mejor estanqueidad, con menor ingreso de aire, debido a que la estructura de la cuba es fija y la carcasa inferior es móvil.
- Diseño trapezoidal de la cuba, para una mejor distribución de la chatarra y un precalentado eficiente, particularmente cuando la chatarra es de baja densidad.
- Mejor caída de la chatarra en la carcasa, mediante el nuevo diseño del sistema de retención.
- Mayor pie líquido, para favorecer la transferencia de calor y la velocidad de fusión.
- Fusión libre de flickers gracias a la nueva configuración de cuba y electrodos.

En Talleres y Aceros, México, ya arrancó un horno de estas características, para una producción de 1,2 Mt/año [20]. Está anunciado otro para ser instalado en la acería de Arvedi, en Cremona, Italia.

Un concepto que ha tenido hasta ahora una lenta penetración en el mercado, pero presenta algunas diferencias importantes con el horno tolva de Fuchs es el desarrollado por la antigua NKK, hoy parte de JFE Steel, bajo la denominación ECOARC, comercializado en la actualidad por JP Steel Plantech. [21] La carga de chatarra se realiza mediante un carro. La tolva de precalentamiento está unida a la parte superior de la carcasa. La chatarra no está retenida mecánicamente en la tolva, sino que se apila sobre el baño líquido. El tratamiento de gases se realiza con una cámara de post combustión con una temperatura de más de 900°C para asegurar la descomposición de las dioxinas, y una cámara de enfriamiento rápido para evitar que las mismas se recompongan. Hay tres hornos en operación en Japón y uno en Corea. No hay datos de performance publicados. [5]

Los que lo comercializan afirman que es posible lograr un consumo específico de energía eléctrica de 200 kWh/t para un consumo de oxígeno de 50 Nm³/t. Los efectos favorables de los sistemas de precalentamiento de chatarra sobre el consumo específico de energía se verifican en la comparación que incluye exclusivamente hornos que cargan 80% o más de chatarra (para evitar los efectos del arrabio y el hierro esponja en relación con el consumo específico de energía). Claramente, los hornos con algún

tipo de precalentamiento se ubican en la franja de menor consumo, junto con los mejores hornos estándar [5]

Los hornos más recientes con muy altas potencias específicas completan el proceso de fusión en menos de 45 minutos, de forma que con las distintas maniobras de colada consiguen tiempos tap to tap menores a 60 minutos en la mayor parte de las acerías. Los consumos de energía son de alrededor de 390 kWh, con inyección de 30 Nm³ de oxígeno y de 8 kg de carbón por tonelada de acero producida.[22]

El objetivo de la industria inteligente es la digitalización de la industria a través de formas de producción mejor organizadas para obtener mayor capacidad de adaptación ante las necesidades y eficiencia en la asignación de recursos, optimización de tiempos empleados y la combinación de varias áreas de trabajo para así alcanzar puntos óptimos y hacer más productivo cada proceso.

Actualmente el empleo de técnicas de Inteligencia Artificial (IA) para dar solución a problemas relacionados con sistemas complejos y con incertidumbre que no se puedan alcanzar exclusivamente con la teoría del control convencional han alcanzado gran auge pues son sistemas que no se puedan modelar a partir de un modelo matemático simple. Dentro de las técnicas de control inteligente se halla la lógica difusa, útil para automatizar procesos, trasladar la experiencia humana hacia una computadora y procesar información con incertidumbre. Esta técnica fue diseñada para representar y razonar sobre conocimiento expresado de forma lingüística o verbal. Se basa en el modelo lingüístico de la estrategia del operador humano, o sea, en un modelo decisional del experto. La esencia de tal modelo es un programa basado en reglas, por lo que clasifica entre los llamados sistemas expertos.

En base a lo anteriormente expresado se plantea como **problema de la investigación** la incertidumbre para la toma de decisiones del momento ideal de fundición de la cesta; y de mantenimiento del refractario en el Horno de Arco Eléctrico de ACINOX Las Tunas, y como **objeto de la investigación** los procesos de fundición de la cesta y de mantenimiento del refractario en Hornos de Arco Eléctrico.

El **objetivo de la investigación** es: Obtener índices de ayuda a la toma de decisiones que permitan identificar el momento ideal de fundición de la cesta y de mantenimiento del refractario en el HAE de ACINOX Las Tunas.

Como **campo de acción** se definen los índices de ayuda a la toma de decisiones para los procesos de fundición de la cesta y de mantenimiento del refractario en Hornos de Arco Eléctrico.

A partir del análisis efectuado podemos definir la siguiente **hipótesis**: Si se obtienen índices que ayuden a la toma de decisiones en el Horno de Arco Eléctrico de ACINOX Las Tunas, será posible eliminar la

incertidumbre para determinar el momento ideal de fundición de la cesta y de mantenimiento del refractario.

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

1. Caracterizar el proceso de fundición de la cesta en Hornos de Arco Eléctrico.
2. Caracterizar el proceso de mantenimiento del refractario en Hornos de Arco Eléctrico.
3. Determinar las variables apropiadas que permitan obtener índices de cesta fundida y de desgaste del refractario.
4. Obtener índices de ayuda a la toma de decisión que permita al operador determinar el momento ideal de cesta fundida y de mantenimiento del refractario en el HAE de ACINOX Las Tunas.
5. Demostrar la validez de la propuesta mediante simulación.

Para la realización de esta tesis se emplean métodos de investigación teóricos y experimentales. [23] Entre los teóricos se inició con el método histórico-lógico realizando la revisión bibliográfica de los procesos de fundición de la cesta, y mantenimiento del refractario en Hornos de Arco Eléctricos, así como las técnicas de obtención de índices que se utilizan para ayudar a la toma de decisiones en los procesos industriales, profundizando en los aspectos generales del análisis del comportamiento del refractario y de la fundición de la cesta, para aplicar el método hipotético-deductivo que permitió elaborar el marco teórico y la hipótesis de la investigación.

El método de análisis – síntesis se utiliza para determinar y analizar las variables apropiadas para obtener índices de cesta fundida, de desgaste del refractario y del espesor del recubrimiento del refractario mediante una herramienta informática sencilla, rápida e interactiva. El uso de métodos experimentales, como el diseño y la simulación, permite procesar los datos necesarios.

El informe de esta investigación se organiza en introducción, desarrollo que contiene el primer y segundo capítulo, las conclusiones y las referencias bibliográficas.

CAPÍTULO 1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS PARA LA OBTENCIÓN DE ÍNDICES DE AYUDA A LA TOMA DE DECISIONES EN HORNOS DE ARCO ELÉCTRICO.

En este capítulo 1 se describe brevemente en qué consisten los procesos de fundición de la cesta y de mantenimiento del refractario en un HAE. Se hace referencia a índices ya establecidos de ayuda a la toma de decisiones y a los sistemas difusos.

1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO EN UN HORNO DE ARCO ELÉCTRICO.

El HAE funciona como un proceso por lotes. Cada lote de acero que se produce se conoce como hornada o colada. El ciclo de operación del HAE se conoce como el ciclo de Tap-to-Tap. La fabricación del acero en HAE se basa en la fusión de las chatarras por medio de una corriente eléctrica, y al afino posterior del baño fundido. La figura 1 muestra el HAE de ACINOX Las Tunas.



Figura 1: Foto tomada al HAE de ACINOX Las Tunas

El HAE consiste en un gran recipiente cilíndrico de chapa gruesa (15 a 30 mm de espesor) recubierto internamente de material refractario que forma la solera y alberga el baño de acero líquido y escoria. El resto del horno está formado por paneles refrigerados por agua. La bóveda es desplazable para permitir

la carga de la chatarra a través de unas cestas adecuadas. La bóveda está dotada de una serie de orificios por los que se introducen los electrodos, generalmente tres, que son barras gruesas de grafito de hasta 700 mm de diámetro. Los electrodos se desplazan de forma que se puede regular su distancia a la carga a medida que se van consumiendo. Los mismos están conectados a un transformador que proporciona unas condiciones de voltaje e intensidad adecuadas para hacer saltar un arco, con intensidad variable, en función de la fase de operación del horno. Otro orificio practicado en la bóveda permite la captación de los gases de combustión, que son depurados convenientemente para evitar contaminar la atmósfera. El horno soporta una estructura oscilante que le permite bascular para proceder al sangrado de la escoria y el vaciado del baño metálico. El proceso de fabricación se divide básicamente en dos fases: la fase de fusión y la fase de afino.

Fase de fusión: Una vez introducida la chatarra en el horno y los agentes reactivos y escorificantes (principalmente cal) se desplaza la bóveda hasta cerrar el horno y se hacen descender los electrodos hasta la distancia apropiada, consiguiendo saltar el arco hasta fundir completamente los materiales cargados. El proceso se repite hasta completar la capacidad del horno, constituyendo este acero una colada.

Fase de afino: El afino se lleva a cabo en dos etapas. La primera en el propio horno y la segunda en un horno cuchara. En el primer afino se analiza la composición del baño fundido y se procede a la eliminación de impurezas y elementos indeseables (silicio, manganeso, fósforo, etc.) y realizar un primer ajuste de la composición química por medio de la adición de ferroaleaciones que contienen los elementos necesarios (cromo, níquel, molibdeno, vanadio o titanio). El acero obtenido se vacía en una cuchara de colada, revestida de material refractario, que hace la función de cuba de un segundo horno de afino en el que termina de ajustarse la composición del acero y de dársele la temperatura adecuada para la siguiente fase en el proceso de fabricación.

En la tabla 1 se muestran las características de cada elemento que conforma el HAE de ACINOX Las Tunas.

Tabla 1: Características de los elementos del HAE de ACINOX Las Tunas

Elementos del HAE	Características
Capacidad	60 ton
Diámetro del horno	5.1 m
Diámetro de los electrodos	0.5 m
Potencia del transformador	40 MVA + 8%
Alimentación	AC trifásico, 60 Hz
Corriente de los electrodos por fases	30 – 45 kA
TAP del Transformador	21
Materias primas	Chatarra

Además del aumento de tamaño, la característica más importante en la evolución de los HAE durante las últimas décadas consiste en la serie de mejoras que han concluido a la obtención de un factor de utilización elevado. Para ello, se ha tenido que lograr un alto grado de mecanización de todos los procesos que intervienen en el trabajo del horno. Estos intentos han culminado en la disminución del tiempo de carga y como la mayoría de las pérdidas vinculadas al horno son directamente proporcionales al tiempo, una disminución en el período necesario para las diversas operaciones componentes del procedimiento de carga, significa un aumento en el rendimiento total del horno. Es necesario tener presente esta importante característica cuando de aumentar el rendimiento se trata.

1.1.1. PROCESO DE FUNDICIÓN DE LA CESTA EN HORNO DE ARCO ELÉCTRICO.

El primer paso en la producción de cualquier colada u hornada es seleccionar el grado de acero a producir. Los operadores del patio de chatarra preparan las cestas de chatarra de acuerdo a las necesidades de la fusión. La preparación de la cesta de carga es una operación importante, no sólo para garantizar la adecuada fusión acorde a la química del proceso sino también para garantizar buenas condiciones de fusión. La carga puede incluir cal y carbón o estos se pueden inyectar en el horno durante la colada. Muchas operaciones añaden un poco de cal y carbón en la cesta de chatarra y la completan con inyección. Para la carga de la cesta al interior del horno, la bóveda y los electrodos son desplazados hacia la parte opuesta de donde la grúa con la cesta llena de chatarra se desplaza para colocarse sobre el HAE. La parte inferior de la cesta es generalmente un diseño de concha de almeja, es decir, la cesta se abre mediante dos segmentos en la parte inferior de la cesta para retraerlo.

La chatarra cae al interior del horno y la cesta vacía es retirada de la parte superior del horno por la grúa. La bóveda y los electrodos vuelven a colocarse en el horno. La bóveda baja y luego se bajan los electrodos para generar un arco sobre la chatarra comenzando así la fusión como parte del ciclo.

El período de fusión es el corazón de las operaciones del HAE. El HAE se ha convertido en un equipo de alta eficiencia para la fusión y diseños modernos se centran en maximizar su capacidad de fusión. La fusión se logra mediante el suministro de energía eléctrica y química al interior del horno. La energía eléctrica se suministra a través de los electrodos de grafito y es generalmente el mayor contribuyente en el proceso de fusión. Inicialmente, un Tap de voltaje intermedio es seleccionado para que los electrodos puedan perforar la chatarra. Por lo general, chatarra ligera es colocada en la parte superior de la carga (cesta) para acelerar la creación de los agujeros (cede de los electrodos en la chatarra). Después de unos pocos minutos, los electrodos han penetrado suficientemente en la chatarra como para que un arco largo (tensión alta) del Tap se pueda utilizar sin temor de daño por radiación a la bóveda. El arco largo maximiza la transferencia de potencia a la chatarra y crea rápidamente un charco de metal líquido en el fondo del horno. Aproximadamente el 15% de la chatarra se funde durante el período de penetración de los electrodos. Al inicio de la fusión el arco es irregular e inestable. Grandes oscilaciones de corriente se observan acompañadas por el movimiento rápido de los electrodos. A medida que la atmósfera del horno se calienta el arco tiende a estabilizarse y una vez que el baño esté totalmente líquido, el arco se hace muy estable y aumenta la potencia promedio de entrada.

La energía química se puede suministrar a través de varias fuentes, tales como quemadores de oxi-combustible y la inyección de oxígeno. Los quemadores de Oxi-combustible de gas natural con oxígeno o una mezcla de oxígeno y aire. El calor es transferido a la chatarra por radiación y por convección. El calor es transferido dentro de la chatarra por conducción. En algunas operaciones, el oxígeno se utiliza para cortar chatarra. Grandes piezas de chatarra toman más tiempo para derretirse en el baño que las piezas pequeñas. Una lanza de tubo consumible puede ser utilizada para cortar la chatarra. El oxígeno reacciona con el hierro contenido en la chatarra caliente quemándose y produciendo un intenso calor para el corte de la chatarra. Una vez generado el charco de acero líquido en el horno, el oxígeno se puede inyectar directamente en el baño. Este oxígeno reacciona con varios componentes presentes en el baño donde se incluyen entre otros, el aluminio, el silicio, el manganeso, el fósforo, el carbono y el hierro. Todas estas reacciones son exotérmicas (es decir, generan calor) y la energía suministrada o aportada ayuda en la fusión de la chatarra. Los óxidos metálicos que se forman con el tiempo pasan a la escoria. La reacción del oxígeno con el carbono contenido en el baño produciendo monóxido de carbono que a su

vez se puede quemar en el horno si hay oxígeno disponible. De lo contrario el monóxido de carbono se trasladará al sistema de evacuación directa de los gases.

Una vez que la chatarra se ha fundido lo suficiente para dar cabida a la segunda carga, el proceso de carga se repite. Después que la chatarra de la carga final es fundida, las paredes laterales del horno pueden estar expuestas a la alta radiación del arco. Como resultado, la tensión debe ser reducida. Por otra parte, la creación de una escoria espuma permitirá envolver el arco (ahogarlo) protegiendo con ello las paredes del horno. Además, una mayor cantidad de energía será retenida en la escoria y es transferida al baño metálico, resultando en una mayor eficiencia energética. Cuando la chatarra de la última carga es fundida completamente, se alcanza la condición de baño plano. En este punto, se toma la temperatura del baño y una muestra de análisis químico. El análisis de la composición química del baño permitirá que el fundidor sepa o determine la cantidad de oxígeno que inyectará durante el afino. El fundidor también puede empezar a ordenar el grueso de las adiciones de los elementos aleantes que realizará en el vertido del horno.

1.1.2. PROCESO DE MANTENIMIENTO DEL REFRACTARIO EN HORNOS DE ARCO ELÉCTRICO.

Los refractarios son materiales que soportan altas temperaturas sin cambio significativo en sus propiedades químicas o físicas. Los materiales refractarios, son muy importantes para la operación del HAE ya que permiten la contención del acero líquido en la solera del horno sin dañar la estructura del horno. Los ladrillos de magnesia o magnesia-carbono (revestimientos monolíticos en las zonas superiores del horno) generalmente se aplican dentro de las paredes laterales y los fondos de los hornos de arco eléctrico (HAE) como revestimiento refractario en la fabricación de acero (ver figura 2).

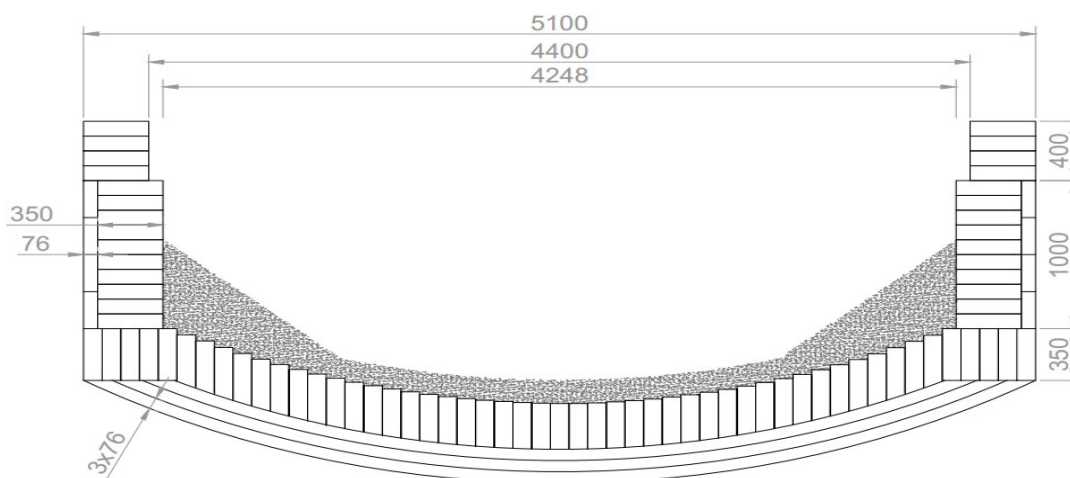


Figura 2: Distribución de ladrillos refractarios en el HAE de ACINOX Las Tunas

Los materiales refractarios utilizados para la sustitución y reparación periódicas del revestimiento del HAE representan una valiosa inversión financiera asociada también con varias horas de inactividad y pérdidas de producción. Se conoce que la tasa de desgaste refractario en el horno de arco eléctrico tiene la mayor extensión en comparación con todos los demás agregados siderúrgicos. [24]

Cada HAE tiene características o condiciones únicas que requieren un mantenimiento del refractario específico. Los revestimientos refractarios del HAE, se mantienen por gunitado, brascado y remendado con ladrillos.

El mantenimiento por gunitado consta de mezclar agua con una mezcla de gunitado basada en magnesita y vaciar esta mezcla sobre el revestimiento refractario. El gunitado se utiliza para mantener los puntos calientes, erosión de la línea de escoria, orificio de vertido, el área frente a la ventana o cualquier otra parte que experimente desgaste selectivo del refractario. El material de gunitado por lo general, es una medida temporal y tendrá que ser regunitado en el mismo lugar dentro de las próximas coladas. El mantenimiento por gunitado, si bien temporal, ofrece una vida balanceada nivelando el patrón de desgaste altamente selectivo en el revestimiento del horno. Es decir, el desgaste del refractario en hornos de CA, es por lo general mayor en la pared más cerca al electrodo del mástil; y gunitando esta área, maximiza el funcionamiento del revestimiento total.

El mantenimiento por brascado se conoce también por parcheo a la solera en seco. Es la técnica utilizada para remendar huecos en el fondo monolítico. Una versión de sinterización rápida del material de solera granular, o el producto original, se utilizan para el brascado. El material seco se palea o se deja caer por una grúa dondequiera que haya un hueco o pedazos de turba en el fondo monolítico. Ocasionalmente el

imán se utiliza para nivelar este material de remiendo, que entonces sinteriza en el lugar durante la próxima colada. Con esta técnica de brascado, el fondo monolítico a menudo dura en todas partes de 3 meses a 1 año o incluso más tiempo.

Remiendo con Ladrillos. Después de varias semanas de operación, el mantenimiento por gunitado se hace menos eficiente en mantener el revestimiento refractario. La mayoría de los operadores entonces cogen el horno frío y cavarán en cualquier parte del 30 – 80% de la pared y los puntos calientes. Los fragmentos de ladrillo se eliminan del horno y los trabajadores instalan un ladrillo nuevo en todas las áreas de los puntos calientes y de la pared que fueron eliminados. A menudo se reinstalan la misma calidad y espesor del refractario que se utilizó en el revestimiento inicial. Alternativamente, revestimientos de menor calidad y más delgados se instalan durante este remiendo y una vida del revestimiento ligeramente menor es esperado del remiendo como sería recibida de un revestimiento completo nuevo. El remiendo de ladrillo se completa gunitando una mezcla de gunitado de MgO dentro de todos los vacíos en el enladrillado remendado.

Por lo general durante un remiendo de ladrillo, el orificio de vertido se sustituye o repara completamente con mezcla de apisonado o material de gunitado, si no se sustituye con ladrillado. La mayoría de los operadores de hornos desarrollarán un programa de remendado con ladrillo regular para sus hornos. Esto pudiera ser uno o dos remiendos intermedios para cada trabajo de la pared completo. Algunos operadores han utilizado el concepto de remendado continuo donde algunos ladrillos se sustituye solamente una o dos veces por año. Estas decisiones de mantenimiento y remendado por lo general son impuestos por la necesidad de las condiciones operativas, así como la filosofía de mantenimiento económico de la compañía.

La filosofía operacional a menudo tiene un impacto significativo en el funcionamiento del refractario. Si la producción máxima es la filosofía operativa clave, las decisiones estarán dirigidas a las producciones máximas y puede traer como resultado mantenimiento del refractario menor que el óptimo. Maximizar la producción requiere por lo general un revestimiento refractario inicial de alta calidad que se espera que dure un largo tiempo sin mucho mantenimiento del refractario. Hay un punto de cruce donde una falta de mantenimiento realmente reduce la productividad, de manera que la filosofía de producción máxima a menudo requiere un delicado balance sobre el diseño y mantenimiento del revestimiento refractario. La filosofía de costo mínimo, también es común. Aquí el revestimiento refractario inicial es barato, marcas químicas que se esperan que duren un largo tiempo a través de mantenimiento por remendado o gunitado. Los revestimientos de costo mínimo, generalmente tienen poca dimensión por zonas y a

menudo utilizan la misma marca y espesor del revestimiento por todo el horno. Esta filosofía puede ser efectiva para operaciones de baja intensidad.

La Campaña Predecible generalmente requiere un período fijado entre cambios de revestimiento o remiendos. En este escenario el operador del horno programa producción completa para un período de dos semanas o tres, conociendo que el revestimiento del horno logrará ese tiempo. Entonces se programa un remendado o cambio de revestimiento y se empieza otra campaña predecible. Esta filosofía requiere coordinación estrecha y optimización del diseño de refractario con operaciones del Taller.

El Tiempo de Parada Mínimo es similar al de máxima producción, pero sin el mismo fervor de producción total. Aquí el revestimiento refractario debe entregar operaciones predecibles con muy poco mantenimiento, por lo que se requiere por lo general un revestimiento inicial de alta calidad. No hay mucho tiempo para parada o mantenimiento hasta la rotación de parada o día de parada programada. El mantenimiento predecible es aceptable, pero debe ser sobre una base regularmente programada.

1.2. ÍNDICE DE AYUDA A LA TOMA DE DECISIONES EN EL PROCESO DE FUNDICIÓN DE LA CESTA EN HORNOS DE ARCO ELÉCTRICOS.

Luego de realizar una búsqueda bibliográfica acerca de la existencia de algún índice que ayude al operador de HAE a determinar el momento ideal en que la cesta esta fundida se concluye que, se han logrado avances en todo el proceso de fundición del acero, pero no fue encontrado en la literatura consultada un índice específico.

Debido al hecho de que el objetivo principal de la etapa de fusión es fundir la chatarra en el menor tiempo posible, la oportunidad de reducir incluso un minuto de este proceso es muy importante. Ya se ha mencionado que la chatarra es la única carga en el proceso de horno de arco eléctrico que debe fundirse en el menor tiempo posible. Reduciendo incluso un minuto de este período de tiempo puede ser muy importante y puede permitir ahorrar dinero y energía.[25]

Hay varias formas de lograr el objetivo[26, 27] : mediante una gestión adecuada del proceso (p. ej., adaptación de la impedancia y la materia prima del horno. El tipo de chatarra que se utiliza con mayor frecuencia es la denominada chatarra comercial, que consiste en una variedad de elementos.

La Agencia Internacional de la 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%.[28]

Esto plantea un desafío al desarrollo de tecnologías en este campo, para aumentar la eficiencia térmica del horno eléctrico, incrementar su productividad, disminuir su costo operativo y mejorar su performance ambiental.

Se han desarrollado diversos modelos de cálculo de carga, que, manteniendo ciertas restricciones de calidad, permiten minimizar el costo de la misma. [29]

Desde junio de 2012 se utiliza en el horno eléctrico de 150 t de Riva SAM, Neuves Maisons, Francia, el nuevo sistema de carga de chatarra desarrollado por Siemens, denominado comercialmente Chargeopt. Permite automatizar totalmente y optimizar los movimientos de la grúa durante la carga. Los patrones de movimiento repetibles con precisión acortan los ciclos de carga, reducen la necesidad de mantenimiento y aumentan la seguridad de funcionamiento. El operador de la planta dispone de un sistema de automatización homogéneo desde el depósito de chatarra hasta el horno de arco eléctrico. El control puede efectuarlo el jefe de turno, desde la sala de control. [30]

Hasta la fecha el estándar para los nuevos HAE continúa siendo con carga de chatarra a temperatura ambiente, mediante cestas. Sin embargo, en situaciones específicas los hornos con precalentamiento de chatarra han atraído interés. Hay cerca de 60 hornos en operación (35 Consteel, 19 Shaft furnaces y 4 Eco-Arc). El más difundido consiste en la carga continua con precalentamiento mediante el calor de los gases de escape en contra corriente; los dos restantes se basan en el precalentamiento en cubas. [5]

Los primeros hornos con estas tecnologías arrancaron cerca de 1990. En [31] se presenta un análisis más detallado de las dos tecnologías dominantes.

A medida que los hornos han aumentado en tamaño, ha crecido el número de cestas necesario para completar la carga. Esto implica una pérdida de productividad, dado que se necesita tiempo para el movimiento de ascenso de los electrodos, el giro de la bóveda, la descarga de la cesta, nuevamente el giro de la bóveda y el descenso de los electrodos. La preparación adecuada de la chatarra ayuda a incrementar su densidad aparente y disminuir el número de cestas necesario. [5]

Recientemente se han diseñado hornos que admiten una carga con una sola cesta, y se han modificado hornos existentes para admitir una carga única, aunque sea realizada con dos cestas. Se presentan cuatro ejemplos de plantas de Estados Unidos: Gerdau Jacksonville [32] ; Nucor Steel Jewett [33] , SDI Butler [34] y Evraz Pueblo [35].

Los avances respecto al control automático del proceso han cubierto todo el espectro de operaciones del horno, desde la preparación de cestas hasta la operación de sangrado. Se han implementado sistemas digitales de regulación de electrodos, programas de aplicación de energía eléctrica y energía química.

Dos aspectos que están en desarrollo son: el control en línea de la escoria espumosa y el control dinámico del proceso mediante el análisis de los gases de escape del horno y otros sensores. [5]

Se han desarrollado sistemas de evaluación de la escoria espumosa basados en la medición de variables eléctricas, del ruido y de las vibraciones en la pared exterior del horno. Los datos proporcionados por estos sistemas pueden ser utilizados por el operador para la toma de decisiones; pero también se ha buscado utilizar estos sistemas como base para regular en línea la adición de carbono. [5]

Uno de estos sistemas se denomina comercialmente Simetal FSM (Foaming Slag Manager). Se basa en la medición de vibraciones en la carcasa del horno, y se desarrolló en la acería de Lech Stahlwerke, Alemania [36]. La altura de escoria determina la transmisión del sonido a la pared del HAE. Sobre la base de las señales de altura de escoria, mediante un programa de control basado en lógica difusa se realiza el control de las válvulas de los inyectores de carbono, fijando el objetivo de tener una altura uniforme de escoria en las tres regiones evaluadas. Además de Lech Stahlwerke otras plantas han adoptado este sistema.

Existen diversos sistemas, tales como el EFSOP de Tenova y el HeatOpt, comercializado por Siemens, que ha sido instalado recientemente en la planta de Roanoke de Steel Dynamics [37]. Este sistema Heat - Opt está basado en tres mediciones:

- Análisis de gases, mediante el sistema LOMAS, ampliamente utilizado en convertidores al oxígeno.
- Medición de caudal y velocidad de gases de escape SAM.
- Evaluación de escoria espumosa mediante medición de armónicas FOX.

Sobre la base de estas tres mediciones, y utilizando modelos desarrollados al efecto, se controla en forma automática la inyección de oxígeno para post combustión, los quemadores de oxígeno y gas y la inyección de carbono para el espumado de la escoria.

En cuanto a la seguridad en la plataforma ha habido una gran cantidad de innovaciones en los últimos tiempos, con el objetivo de minimizar la necesidad de que el personal de operación del horno deba estar cerca del mismo en diversas situaciones que pueden implicar riesgos de accidente [38]:

- Sistemas de enfriamiento más seguros y duraderos.
- Robot para posicionamiento y ajuste de electrodos.
- Robot para toma de muestras, temperatura y actividad de oxígeno.
- Automatización de la operación del agujero de colado
- Puertas de escoria controladas desde la sala de control.

En algunos de estos casos se pueden obtener ventajas adicionales en relación con la disminución de tiempo con horno desconectado, y por ende aumento de productividad, y en algunos casos mejoras en la calidad del acero producido, pero el eje que justifica estas innovaciones es la seguridad del personal de operación y mantenimiento del horno.

Los HAE han evolucionado considerablemente en los últimos 20 años. Pasaron los días cuando la energía eléctrica era la única fuente de energía para la fusión de la chatarra. Anteriormente eran comunes tiempos de Tap-to-Tap en el rango de 3 a 8 horas. Actualmente con los adelantos de la tecnología, es posible hacer coladas en menos de 1 hora con consumos de Energía Eléctrica en el rango de 380 – 400 KWh./ton [39]

El HAE ha evolucionado hacia una fusión rápida de chatarra y de bajo costo donde el criterio principal es una mayor productividad con el fin de reducir costos fijos. Las innovaciones que ayudaron a lograr las tasas de producción más altas, incluyen quemadores oxi – combustible, inyección de oxígeno, inyección de carbono/cal, práctica de escoria espumosa, post-combustión en la parte superior del HAE, agitación del baño, suministro elector modificado (reactores en serie, etc.), brazos de electrodos conductores de corriente, tecnología de HAE de CD y otras tecnologías de procesos innovativos (precalentamiento de la chatarra, carga continua, etc.).[40]

La práctica industrial y la situación del mercado muestran que aún existe incertidumbre sobre la determinación de los parámetros del proceso de fusión (por ejemplo, temperatura del acero). El método más obvio para identificar la temperatura del acero en el horno es la observación del proceso de fusión. Sin embargo, debido a la alta temperatura y la alta densidad de polvo, las llamas (que se componen de una variedad de gases de combustión, donde cada uno de ellos absorbe la luz en diversos grados y diferentes longitudes de onda) y otras circunstancias en el HAE, una observación confiable del proceso es casi imposible. Recientemente, papeles refiriéndose a las primeras pruebas de observaciones directas del proceso de fusión en un horno eléctrico apareció.

Con este fin, se ha desarrollado una tecnología basada en cámaras para supervisar el proceso de fusión de la chatarra en el HAE. Sin embargo, este método actualmente no tiene ninguna aplicación práctica. Otra forma de identificación experimental de la temperatura en el HAE es una medición de temperatura continua. Resultados de las primeras pruebas mostró que existe la posibilidad de medir con precisión la temperatura del acero en el horno durante todo el ciclo del horno.

En la tabla 2 se presenta un resumen de todos los artículos analizados referente a como determinar cuando la cesta esta fundida.

Tabla 2: Resumen bibliográfico para determinar cuando la cesta esta fundida.

Autor Principal	Año	Título	Sistema de Monitoreo de Condición	Inteligencia Artificial
Gripenberg	1990	Optimal Distribution of Oxygen in High Efficiency Arc Furnaces"	1	
Jones,	1998	Electric furnace steelmaking," The making, shaping and treating of steel	1	
Baumert	2003	Dynamic modelling of the electric arc furnace process using artificial neural networks		1
Boulet	2003	Modeling and control of an electric arc furnace		1
Laurenti	2005	High performance single-bucket charging EAF practice	1	
BARDZO	2008	METHOD WITH AUTOMATIC CARBON CONTROL		1
Blachnik	2010	A model for temperature prediction of melted steel in the electric arc furnace (EAF)		1
Madias	2010	Recuperación de energía en hornos eléctricos de arco		1
Butcher	2010	Single charge EAF modification: Installation and experience	1	
Patrizio	2010	One bucket charging Fastarc	1	
Gottardi	2011	Enhanced Slag Door for Electric Arc Furnace	1	
Dorndorf	2013	The holistic approach for efficient scrap melting	1	
Madias	2016	UNA REVISIÓN CRÍTICA DE DESARROLLOS TECNOLÓGICOS RECIENTES EN HORNOS ELÉCTRICOS DE ARCO		
Total			7	5

1.3. ÍNDICE DE AYUDA A LA TOMA DE DECISIONES EN EL PROCESO DE MANTENIMIENTO DEL REFRACTARIO EN HORNOS DE ARCO ELÉCTRICO.

El desgaste prematuro del revestimiento de la carcasa inferior y las fallas de los paneles cubiertos de escoria en la carcasa superior provocan la interrupción de la producción. Por tanto, fue consecuente definir un parámetro para diseñar y controlar el proceso del horno que caracterice la emisión de radiación y el desgaste del revestimiento refractario, respectivamente [41].

En 1962, Schwabe [42] definió el índice de erosión refractaria RE como una medida de la carga térmica de la pared y un indicador de la tasa de desgaste. La afirmación central es que la radiación del arco es proporcional a la potencia activa P_{arc} y la longitud del arco L_{arc} . Dado que la tensión del arco U_{arc} es una medida de la longitud del arco L_{arc} , se aplica lo siguiente:

$$R_E = P_{arc} U_{arc} \quad (1.1)$$

donde:

RE , es el Índice de Erosión Refractaria

P_{arc} , es la Potencia Activa del Arco

U_{arc} , es la tensión del Arco

El HAE directo utiliza la radiación de los arcos eléctricos para fundir el acero. Sin embargo, la intensa radiación puede dañar el revestimiento refractario de las paredes y el techo del horno, reduciendo su vida útil aproximadamente a la mitad. [43]

La extensión del daño refractario depende de la potencia del arco y la tensión del arco. Un índice de daño refractario, llamado índice de erosión refractaria, basado en esta observación, se presenta en [44]. Si bien este número no puede relacionarse directamente con el número de calores obtenibles en el refractario de la pared lateral, tiene un valor empírico para evaluar cómo se deben desarrollar los perfiles de fusión para un producto y material de carga dado. [45] El modelo de imitación del arco utilizado aquí se basa en el de Jordan [46] y ampliado por Munroe. [47, 48]

En el pasado, se hicieron varios intentos para predecir el desgaste del refractario y utilizar la predicción para sincronizar los ciclos del refractario con las paradas de producción planificadas. Uno de los ejemplos más populares es la Fórmula de Nagoya [6] para el desgaste del convertidor, desarrollada a finales del

siglo XX, que vincula el desgaste y los datos del proceso de fabricación de acero mediante el uso de conocimientos especializados para seleccionar y ponderar los factores que influyen.

Los refractarios están diseñados para soportar duras condiciones de funcionamiento. El polvo pesado, las temperaturas a menudo superiores a 1600 °C y los múltiples mecanismos de corrosión simultáneos [49] limitan la posibilidad de realizar mediciones exactas y, por tanto, la previsibilidad de la vida útil del refractario. El revestimiento refractario actúa como una capa protectora para la pared exterior del HAE y permite que el proceso funcione. Por lo tanto, hacer coincidir la vida útil de los refractarios con los principales ciclos de mantenimiento del proceso para así evitar los procesos de cuello de botella es un objetivo clave. [7]

En otros estudios [14], se emplea un equipo perfilador láser con un sistema de visión para la configuración automática del sistema de coordenadas y los algoritmos de control necesarios. Los métodos de visión se implementaron a través de un programa informático. Los objetivos de este trabajo fueron: mejorar la repetibilidad de la configuración del sistema de coordenadas y así facilitar un control de desgaste más preciso, lo que lleva a mayor vida útil del revestimiento gracias a la capacidad de utilizar tolerancias más pequeñas sin aumentar el riesgo de quemaduras, reducir la probabilidad de error humano en la configuración y minimizar el uso de costosos tiempos de proceso.

A lo largo de los años, el índice de erosión refractaria RE y/o el índice de desgaste refractario RWI se habían modificado varias veces, y según Dittmer y Kru'ger [50] con resultados contradictorios. Los modelos avanzados muestran una relación entre la carga térmica de la pared por la potencia de radiación Q_{arc} del arco y la clasificación de corriente I_{arc} y/o resistencia R_{arc} . [51] Dittmer y Kru'ger [50] consideran la caída de voltaje en el ánodo y el cátodo, así como la depresión de la fusión causada por el efecto de chorro del arco. Los autores derivan el modelo de radiación modificado:

$$Q_{arc} \sim \frac{U_{arc} - 80V}{\sqrt[8]{I_{arc}}} \quad (1.2)$$

En caso de fusión asimétrica de la pila de chatarra o carga excesiva de la pared, la intensidad de la radiación se puede corregir de acuerdo con la ecuación 2, por ejemplo, modificando el punto de ajuste de impedancia. El objetivo es fundir homogéneamente la chatarra y sobrecalentar el metal fundido.

Es necesario pensar en la prolongación de la vida útil del revestimiento de HAE para alcanzar el máximo efecto económico. Este objetivo está asociado a la eliminación de factores negativos que dañan el revestimiento como la influencia permanente de altas temperaturas (1500-1700 °C), tensiones mecánicas y reactivas a temperaturas bajas y elevadas, interacciones químicas con escoria y metal (principalmente contenido de FeO, SiO₂), choques térmicos, erosión, impacto directo de arco eléctrico, uso de oxígeno

gaseoso y otros. [52-61] Los cambios en la tecnología del HAE podrían modificar significativamente el proceso de desgaste.

En [62] se realiza un estudio sobre el análisis de la influencia de la composición de la escoria y el metal en el nivel de desgaste del revestimiento refractario del hogar del HAE basado en la evaluación estadística de los datos de la planta. Los resultados se vieron afectados por el factor de dispersión de los datos estadísticos del taller usados con el factor humano (muestreo manual de escoria y metal, método no ideal de medición del grado de desgaste). La medición del nivel de desgaste refractario del hogar (ladrillos de MgO-C con un contenido de carbono del 15%) se realizó calculando las diferencias entre los ladrillos refractarios nuevos y gastados relacionándolos al número de coladas.

Otro estudio realizado [63] lleva a cabo la comparación de los resultados de la temperatura en la superficie del molde obtenidos de la simulación numérica de llenado y solidificación de un lingote de 90 toneladas producido en VÍTKOVICE HEAVY MACHINERY con los resultados de la medición termográfica. El objetivo de las simulaciones es optimizar las condiciones de colada y solidificación de lingotes de forja pesada con énfasis en minimizar las macro-segregaciones. Para que la versión predeterminada del modelo numérico de llenado y solidificación del lingote de acero se corresponda con las condiciones reales de solidificación con la mayor precisión posible. La temperatura en la superficie del molde se verificó mediante la medición de termografía.

Los sistemas avanzados de termografía infrarroja se utilizan hoy en día en muchos sectores de la actividad humana. Debido a su accesibilidad y mejores parámetros técnicos, los sistemas de termografía infrarroja pueden ser utilizado en medicina, industria ligera y pesada, estructuras de construcción [64], industria del automóvil o dentro del mantenimiento predictivo de máquinas, aparatos y dispositivos y otras investigaciones científicas y aplicaciones. [65] Los métodos de termografía infrarroja de desarrollo muy dinámico se pueden aplicar en mediciones reales, es decir, termografía activa que conduce a otras aplicaciones. [66]

Los sistemas radiométricos infrarrojos de onda larga se utilizan ampliamente en diversas industrias, así como en investigación y desarrollo. Este sistema de onda larga es la herramienta perfecta para un diagnóstico rápido del estado del equipo, fácil detección de defectos, que se refleja en temperaturas más altas debido a aumento de la fricción y el desgaste. Los sistemas radiométricos infrarrojos de onda larga se utilizan especialmente en ingeniería, ingeniería eléctrica, metalurgia y muchas otras industrias. También están acostumbrados a optimizar y mejorar los procesos productivos. Información sobre el estado del desgaste del revestimiento refractario del HAE se puede obtener a partir de las imágenes

obtenidas. Los resultados obtenidos se pueden utilizar para simulaciones numéricas más precisas del proceso de fundición del acero. [67]

En [67] la serie de mediciones utilizando el sistema de infrarrojos radiométricos de onda larga en planta siderúrgica se realizaron imágenes de campos de temperatura del horno cuchara, de la rodilla de escape refrigerada del HAE y los lingotes que se obtuvieron durante el proceso de solidificación del lingote de acero de esta industria. Información sobre el estado del desgaste del revestimiento refractario de la cuchara y la rodilla de escape refrigerada se pudieron obtener a partir de las imágenes obtenidas. Los resultados obtenidos se pueden utilizar para simulaciones numéricas más precisas del proceso de fundición y solidificación de lingotes de acero.

El campo de temperatura de la cuchara se puede mapear muy bien utilizando una cámara térmica. Algunas áreas con defectos pueden identificarse fácilmente. Estos defectos se deben principalmente a un peor estado del refractario de la cuchara. Si hay un lugar determinado con mayor erosión del revestimiento y el refractario es más delgado que en otros lugares, el lugar alcanza una temperatura más alta. La disminución del revestimiento de la cuchara y también la determinación del plazo apropiado de reemplazo del revestimiento de la cuchara se puede rastrear mediante un monitoreo a largo plazo con la cámara térmica. [67]

El riesgo de que se derrita la cuchara se puede evitar si se comprueba que el revestimiento refractario ya está muy desgastado. Por otro lado, los operadores pueden tomar la decisión de reemplazar el revestimiento refractario porque está realmente desgastado y no solamente según la práctica habitual después de ciertas cantidades de coladas. Los valores medidos son útiles en la práctica porque las diferencias en los campos de temperatura son siempre las mismas, independientemente de los parámetros de entrada del entorno circundante que se utilicen durante la medición. Esta conclusión se basa en el método utilizado de termografía cualitativa comparativa, que se basa en comparar los mapas de temperatura o los perfiles de temperatura del mismo o similar elemento en las mismas o similares condiciones. Entonces, sería posible lograr ciertos ahorros. [67]

Los mecanismos de desgaste de los refractarios utilizados en un techo delta fueron investigados en [68]. TRB Company utilizó sus habilidades y experiencia para comprender el proceso de uso de este componente sensible, incluidas algunas herramientas innovadoras: medición inmersiva por termopares, cámara térmica IR, escáner láser 3D, simulación numérica termo-mecánica, SEM, fluorescencia de rayos X y difracción de rayos X. Se realizaron mediciones a diferentes alturas y posiciones utilizando 11 termopares tipos K y un registrador de datos para almacenar las temperaturas. Para completar la

medición, se utilizó una cámara térmica para obtener la temperatura del fondo delta. Este estudio consiste en un cálculo transitorio totalmente acoplado: térmico y mecánico. Los límites térmicos consideran la radiación y/o convección de la escoria de fusión, los electrodos, el aire ambiente y el sistema de enfriamiento en el delta. Los límites mecánicos solo consideran la influencia alrededor del delta. La superposición de varios puntos editados en diferentes fechas da una estimación precisa del espesor de desgaste y también del revestimiento refractario restante.

En [69] se presenta un sistema de monitoreo de condición en un horno de arco eléctrico en una empresa siderúrgica. El HAE es un activo, que se mantiene funcionando continuamente a altas temperaturas y en condiciones ambientales adversas, muchos componentes no se pueden inspeccionar visualmente; así, un sistema de mantenimiento, con capacidades de monitoreo en tiempo real, representa una solución adecuada para mantener bajo control el estado de sus elementos. Además de la actividad de monitoreo, también se debe mostrar la información de riesgo apropiada al personal de mantenimiento para mejorar efectivamente la actividad de mantenimiento. En este sentido, el sistema de monitoreo de condición, aquí presentado, puede considerarse una herramienta de mantenimiento, integrado dentro de una infraestructura de tecnología de información y comunicación existente, y que representa una aplicación práctica del concepto de mantenimiento electrónico dentro de la industria.

La digitalización completa de la industria, también conocida como “Industria 4.0”, promete ganancias de eficiencia significativas y también provocará cambios. Este desarrollo ya ha comenzado a tener un impacto en las operaciones de refractarios en las plantas de acero: la automatización inteligente, los procesos digitalizados y el análisis de grandes datos, están cambiando el entorno de trabajo. Dichos sistemas pueden reducir la mano de obra en entornos de trabajo duros o peligrosos y proporcionar datos más rastreables y confiables para la toma de decisiones. [7]

Dentro de la planta siderúrgica del futuro, también considerada como una “fábrica inteligente”, los sistemas ciberfísicos (CPS) permitirán la comunicación entre humanos, máquinas y productos por igual. [70, 71] Se registra una gran cantidad de datos de proceso en cada paso de la producción de acero. Lo mismo ocurre con la producción de refractarios de RHI, donde se registran todos los parámetros principales del proceso, desde la materia prima, la presión de prensa de cada ladrillo hasta el perfil de temperatura del horno. La visión de RHI es que cada ladrillo tiene un conjunto de datos único y rastreable como un currículum vitae desde la extracción de materias primas hasta la producción y la aplicación en los sitios de los clientes. El tamaño, la complejidad y el formato de grandes conjuntos de datos complican la búsqueda de relaciones causales. En la práctica, esto dificulta que los humanos identifiquen ciertos

factores que pueden afectar la productividad sin la ayuda de las máquinas. Vincular todos estos datos y utilizarlos es lo que RHI llama APO. [7]

APO [72] significa Optimización Automatizada de Procesos y es un proyecto de desarrollo RHI destinado a fomentar una mayor comprensión entre las influencias de producción, mantenimiento y refractario a través del análisis de datos en una computadora central utilizando métodos de inteligencia artificial. APO es un paso para vincular las tecnologías de producción de acero con el conocimiento refractario y avanzar hacia el objetivo de una operación predecible. Al establecer un grupo de datos central, APO permite a los gerentes analizar y comprender el funcionamiento del horno mediante un enfoque holístico. Esto les permite, por tanto, tomar decisiones destinadas a proporcionar operaciones más eficientes, optimizar la producción y aumentar la productividad. [7]

Hoy en día, el índice de desgaste refractario (RWI) [73] se utiliza como medida para la carga térmica de la pared. Mediante la transformación de P_{arc} y U_{arc} y la integración de la distancia r entre el arco y la pared, RWI se expresa como:

$$RWI = const. \frac{I_{arc} U_{arc}^2}{r^2} \quad (1.3)$$

donde:

RWI, es el Índice de Desgaste Refractario

I_{arc} , es la Corriente del Arco

r , es la distancia entre el Arco y la pared del Horno

Las ecuaciones 1 a 3 proporcionan un parámetro integral que no proporciona ninguna información sobre la ubicación de los puntos calientes. [41]

En [15] se explica una técnica preventiva para identificar y reparar problemas menores con el revestimiento refractario. La termografía se utiliza como una herramienta de gran eficacia para identificar los puntos calientes en la superficie de la estructura del horno. Además, facilita las inspecciones preventivas porque algunas áreas del horno son de difícil acceso. La termografía también ayudó a realizar estas inspecciones con frecuencia para identificar los puntos que necesitan atención.

Al utilizar los resultados de la Termografía, combinados con la técnica de inyección masiva desarrollada, es posible evitar la evolución de la fisura del revestimiento refractario, así como evitar el colapso del refractario y de la estructura del horno. Por lo tanto, la termografía utilizada junto con la técnica de

inyección masiva demostró que el procedimiento es una herramienta preventiva eficaz. Siempre que se realice con la frecuencia adecuada, se puede utilizar para identificar y reparar problemas de revestimiento refractario, aumentando así el ciclo de vida del horno.

En [74] se describe el diseño y la instalación de un sistema de monitoreo para el horno cuchara basado en imágenes infrarrojas en una planta en funcionamiento. El sistema funcionó eficazmente para observar la tendencia de la temperatura de la superficie de la cuchara, así como la zona de desgaste del revestimiento refractario para reparar. Se ha descubierto que el sistema es muy eficaz como programa de mantenimiento preventivo para detener o minimizar la rotura de la cuchara.

En [75] se utiliza la termografía para calcular el espesor de ladrillo de diferentes secciones de nueve paneles para un horno eléctrico utilizado para la producción de ferróníquel. El modelo propuesto fue ajustado y actualizado con información teórica. Se observa que el espesor del ladrillo se puede predecir utilizando una técnica no destructiva como la termografía. Esto es significativo como técnica redundante para el monitoreo estructural de la estufa.

En la tabla 3 se presenta un resumen de todos los artículos analizados referente a como se detecta el desgaste del refractario en el mundo.

Tabla 3: Resumen bibliográfico para detectar el desgaste del refractario

Autor Principal	Año	Título	Técnicas Empleadas					
			Fórmula Empírica	Evaluación Estadísticas de datos	Sistema de Medición (Sensores)	Sistema de Termografía Infrarroja (Cámara)	Sistema de Monitoreo de Condición	Inteligencia Artificial
W. E. Schwabe	1962	Electric Furnace Conf	1					
G.R. Jordan	1970	Electrical and Photographic Measurements of High Power Arcs	1					
M.M. Munroe	1981	A Computer Simulation Model of Electric Furnace Arcs	1					
M.M. Munroe	1982	Radiation Characteristics of Electric Furnace Arcs	1					
Motte, J. P.	1988	Optimisation des performances des revêtement de convertisseur à l'aciérie	1					
Heikki Ailisto	1995	Vision guidance of a laser profiler for monitoring			1			

		refractory lining wear in steel mills						
B. Dittmer, K. Krüger	2009	Elektrowärme Int	1					
B. Bowman, K. Krüger	2009	Electric Arc Furnace Physics	1					
Borovský T	2009	Analysis of the slag and metal influence on the life of Electric Arc Furnace Hearth Refractory Lining		1				
Markéta TKADLEČKOVÁ	2012	COMPARISON OF NUMERICAL RESULTS WITH THERMOGRAPHY MEASUREMENT				1		
Peřina, Z	2014	Verification of range of chemical grouting of masonry by non-destructive method using infrared thermography				1		
Eva RYKALOVÁ	2015	Possibilities of Use of the Thermographic Measurement as a tool for detecting defects and improving the production process				1		
Simon Chiartano	2015	STUDY OF WEAR MECHANISMS OF DELTA ROOF REFRACTORIES IN EAF			1	1		
Cristian Colace	2015	Implementation of a condition monitoring system on an electric arc furnace through a risk-based methodology					1	
Lammer, Gregor	2016	Method for determining the state of a refractory lining of a metallurgical vessel for molten metal in particular						1
Hans-Jürgen Odenthal	2017	A Holistic CFD Approach for Standard and Shaft-Type Electric Arc Furnaces	1					

Fernando Luiz Câmara Campos Junior	2018	Pelletizing furnace refractory lining life cycle extension by applying thermography analysis and direct refractory injection				1		
Biswajit Chakraborty	2020	Process-integrated steel ladle monitoring, based on infrared imaging—a robust approach to avoid ladle breakout				1	1	
Luis Carlos Bonilla	2020	Prediction of Refractory Lining Thickness in an Electric Furnace Using Thermography as a Non-destructive Testing Technique				1		
Total			8	1	2	7	2	1

1.4. CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL DESGASTE DEL REFRACTARIO Y LA FUNDICIÓN DE LA CESTA EN EL HORNO DE ARCO ELÉCTRICO DE ACINOX LAS TUNAS.

Con la optimización continua del HAE, por ejemplo, con respecto al enfriamiento del electrodo, vida del revestimiento refractario, aumento en la entrada de energía eléctrica, etc., se han establecido en todo el mundo. Actualmente, hay alrededor de 980 HAE de CA [76]

El proceso del HAE consume mucha energía y representa aproximadamente el 3% del consumo de energía eléctrica en la industria en todo el mundo [77]. Luego de los costos de los materiales de carga (chatarra, aleaciones, etc.), la energía eléctrica tiene la segunda participación más grande en los costos totales de producción de acero en HAE.

La eficiencia energética y de los recursos son factores cruciales para la producción económica de acero. En este contexto, se requieren desarrollos técnicos que mejoren la sostenibilidad y la productividad del proceso a largo plazo. Una alternativa es la simulación numérica. Debido al enorme progreso de la computación de alto rendimiento, ahora se pueden examinar fenómenos físicos complejos.

El crecimiento exponencial de la informática en las últimas dos décadas abre opciones completamente nuevas para simulaciones numéricas del HAE. Las simulaciones se pueden utilizar para analizar fenómenos físicos que resisten observación directa o medición operativa incluso hasta el día de hoy. [41] El funcionamiento del material refractario y mantenimiento del mismo, en el HAE de ACINOX Las Tunas, está a cargo de Ingenieros Metalúrgicos capacitados y de gran experiencia. En entrevistas realizadas se comprobó que actualmente el tiempo y la necesidad de mantenimiento del revestimiento refractario en el HAE están definidos por la evaluación humana. El especialista a cargo programa los mantenimientos teniendo en cuenta el desgaste que va sufriendo el revestimiento refractario por la influencia de factores térmicos como altas temperaturas y cambios bruscos de estas, factores mecánicos como la carga de la cesta, movimiento del metal por vibraciones e insuflado de oxígeno y factores químicos como la reacción entre las escorias ácidas. Estas reparaciones se realizan en caliente (paredes y banco) cada 3 coladas, parcial cada 200 – 300 coladas en dependencia del espesor del ladrillo utilizado, capital (cambio de la solera de seguridad) cada 1400 coladas, punta de piqueta cada 150 coladas y cambio de delta cada 150 coladas. Para ayudar a la toma de decisiones en el HAE se propone obtener un índice de desgaste del refractario a partir del análisis de imágenes infrarrojas.

A partir de entrevistas realizadas a tecnólogos y operadores del HAE de ACINOX Las Tunas y del método de observación durante los experimentos realizados se concluye que para decidir que la cesta está fundida el operador se basa en la variación del ruido del arco eléctrico y la observación directa del proceso de fusión. En ocasiones el arco eléctrico ya no emite un nivel de ruido tan elevado, pero al operador salir a observar si ya la cesta esta fundida, nota que el centro del horno está fundido, pero aún queda chatarra pegada a las paredes. Para ayudar a la toma de decisiones en el HAE se propone la obtención de un índice de cesta fundida mediante la lógica borrosa.

1.5. LÓGICA BORROSA. ASPECTOS GENERALES.

En 1965, en la Universidad de California (Berkeley) se publicó un artículo [78], presentado a la comunidad científica internacional la idea de conjunto borroso, y por extensión, de lo que se conocería como lógica borrosa. Desde entonces, el término lógica borrosa (FL, en inglés Fuzzy Logic), ha sido empleado desde dos puntos de vista diferentes: por un lado, la forma estricta del término hace referencia a un sistema lógico que generaliza la lógica digital clásica para admitir el razonamiento impreciso o bajo incertidumbre; por el otro, en un sentido más amplio y muy comúnmente utilizado, la lógica borrosa engloba todas las teorías y tecnologías que emplean conjuntos borrosos.

En cualquier caso, la lógica borrosa ha conseguido en menos de medio siglo revolucionar la tecnología e impulsar la inteligencia artificial mediante la conjunción de los fundamentos matemáticos, la lógica y el razonamiento. La lógica borrosa es una lógica multievaluada que permite valores intermedios para poder definir evaluaciones convencionales. De esta forma, no se determina si un elemento pertenece o no a un conjunto, sino la calidad de la pertenencia evaluada en un rango completo desde la no pertenencia hasta la pertenencia con la máxima calidad posible. Esta característica permite el análisis del razonamiento aproximado, mucho menos estricto que la lógica bivalente tradicional [79].

Tomando como base la imprecisión del razonamiento humano, pero bajo un planteamiento matemático, la lógica borrosa es capaz de generar la respuesta a una situación basándose en el conocimiento adquirido sobre ésta, aunque éste sea inexacto o incompleto. La lógica borrosa permite establecer límites suaves (o borrosos) para los conjuntos, haciendo que no todo tenga que ser blanco o negro, sino que es posible la existencia de niveles de grises. Se habla de sistema borroso cuando al menos uno de sus componentes emplea lógica borrosa.

En sistemas de control, la lógica borrosa podrá estar presente en la planta, en el controlador o en ambos elementos, así como en los diferentes niveles de la pirámide de automatización como por ejemplo en el de supervisión. El controlador es el elemento que, mediante la aplicación de distintas señales de control, intenta provocar que la planta tenga el comportamiento deseado por el diseñador, según distintos criterios de desempeño, calidad y/o robustez.

El algoritmo de control implementado por éste puede estar realizado mediante lógica borrosa, denominándose en tal caso controlador borroso. En muchas ocasiones se utilizan controladores borrosos cuando el modelo de la planta es desconocido, o demasiado complejo como para ser obtenido, por lo que se suele hablar de sistema de control borroso siempre que se emplea un controlador basado en lógica borrosa en el sistema. Mediante la utilización de la lógica borrosa se pueden desarrollar sistemas de control de procesos o de ayuda en la toma de decisiones, con las siguientes ventajas:

- Eficiencia y rapidez en la implementación, porque brinda una metodología para aprovechar la experiencia de un experto.
- Tiene éxito en aquellos casos en que los datos de entrada por su propia naturaleza son escasos, imprecisos o ruidosos.
- Hace innecesario modelar detalladamente el sistema que se pretende controlar o predecir, porque utiliza un método heurístico.

- Permite controlar sistemas con una no linealidad muy marcada, donde las estrategias tradicionales, casi siempre controladores del tipo PID ofrecen pobres resultados.

1.5.1. CONJUNTOS BORROSOS Y FUNCIONES DE PERTENENCIA.

La lógica borrosa se basa en el concepto de conjunto borroso. Los conjuntos borrosos son una extensión de los conjuntos ordinarios que permiten tratar la imprecisión de forma matemática. Un conjunto ordinario contiene la totalidad de los entes que poseen una propiedad común. Es decir, dada una propiedad de definición de un conjunto, todos los elementos que cumplan dicha propiedad pertenecerán al conjunto, y el resto no. Cuando la propiedad es clara, la pertenencia o no de los elementos a un conjunto queda perfectamente definida, sin embargo, si la definición de un conjunto se realiza de forma ambigua o imprecisa, será imposible saber con certeza si ciertos elementos pertenecen o no al conjunto. La diferencia entre un conjunto borroso y uno ordinario es que los límites de los borrosos no están definidos de forma estricta, sino mediante una función denominada función de pertenencia.

En la lógica clásica, un elemento pertenecerá o no a un determinado conjunto (grado de pertenencia 1 o 0 respectivamente), mientras que, en la lógica borrosa, un elemento puede pertenecer a un conjunto con un grado de pertenencia entre 0 y 1. Al igual que en la lógica clásica, los valores 1 y 0 representan respectivamente la pertenencia absoluta o no del elemento al conjunto, pero en el caso borroso se puede pertenecer a un conjunto con un grado intermedio. Un concepto fundamental en la teoría de conjuntos borroso es el grado de pertenencia. El grado de pertenencia representa la calidad, expresada con un número entre 0 y 1, con la que un elemento pertenece a un determinado conjunto; es decir, la compatibilidad del elemento con el concepto representado por el conjunto. La función que permite obtener el grado de pertenencia de un elemento a un conjunto borroso se denomina función de pertenencia, y se suele denotar mediante el símbolo griego μ . La función de pertenencia del conjunto borroso A se denota como μ_A , y el grado de pertenencia del elemento x al conjunto borroso A , como $\mu_A(x)$. El dominio de definición de la función de pertenencia del conjunto A se conoce como universo de discurso de dicho conjunto [80], y recoge todos los posibles valores de la variable x que pueden ser evaluados mediante la función de pertenencia $\mu_A(x)$. De esta forma, un subconjunto borroso A de un conjunto X , puede definirse mediante una aplicación μ_A que relaciona cada elemento $x \in X$ con su grado de pertenencia al conjunto A , $\mu_A(x) \in [0, 1]$. El grado de certeza de la afirmación x pertenece a A depende de la definición de la

aplicación $\mu_A(x)$, de forma que mientras más se aproxime el grado de pertenencia a uno, mayor veracidad tendrá dicha afirmación. Sea X un conjunto no vacío, un conjunto borroso A está caracterizado por:

$$\mu_A(x) : x \rightarrow [0, 1]$$

Donde $\mu_A(x)$ representa el grado de pertenencia del elemento x sobre el conjunto borroso A para cada $x \in X$. A está completamente determinado por el conjunto de pares:

$$A = \{x, \mu_A(x), x \in X\}$$

Como se observa en la expresión anterior, un conjunto borroso queda caracterizado mediante su función de pertenencia. Ésta puede expresarse de forma discreta, enumerando el grado de pertenencia para cada elemento del conjunto, o mediante una definición matemática. En la mayoría de los casos se emplean funciones de pertenencia definidas matemáticamente, ya que estas funciones permiten realizar estudios posteriores con mayor facilidad y son válidas para cualquier elemento dentro de su universo de discurso. En la Figura 3 se pueden observar distintos ejemplos de funciones de pertenencia, todas ellas con un universo de discurso $X \in [0, 10]$. La primera, $\mu_A(x)$, es la función de pertenencia de tipo pi, mientras que el resto son funciones de pertenencia borrosas: $\mu_B(x)$ es una función de pertenencia gaussiana, $\mu_C(x)$ una del tipo triangular, $\mu_D(x)$ es una función de pertenencia trapezoidal, $\mu_E(x)$ es una del tipo Z y $\mu_F(x)$ es una función de pertenencia S. Muchas de las operaciones presentes en la lógica clásica de conjuntos se pueden generalizar a la lógica borrosa, como por ejemplo las tres operaciones básicas: la unión, la intersección y el complemento; sin embargo, hay operaciones y propiedades de la lógica clásica que no se cumplen al trasladarlas al ámbito borroso, como la ley del medio excluido y el principio de no contradicción.

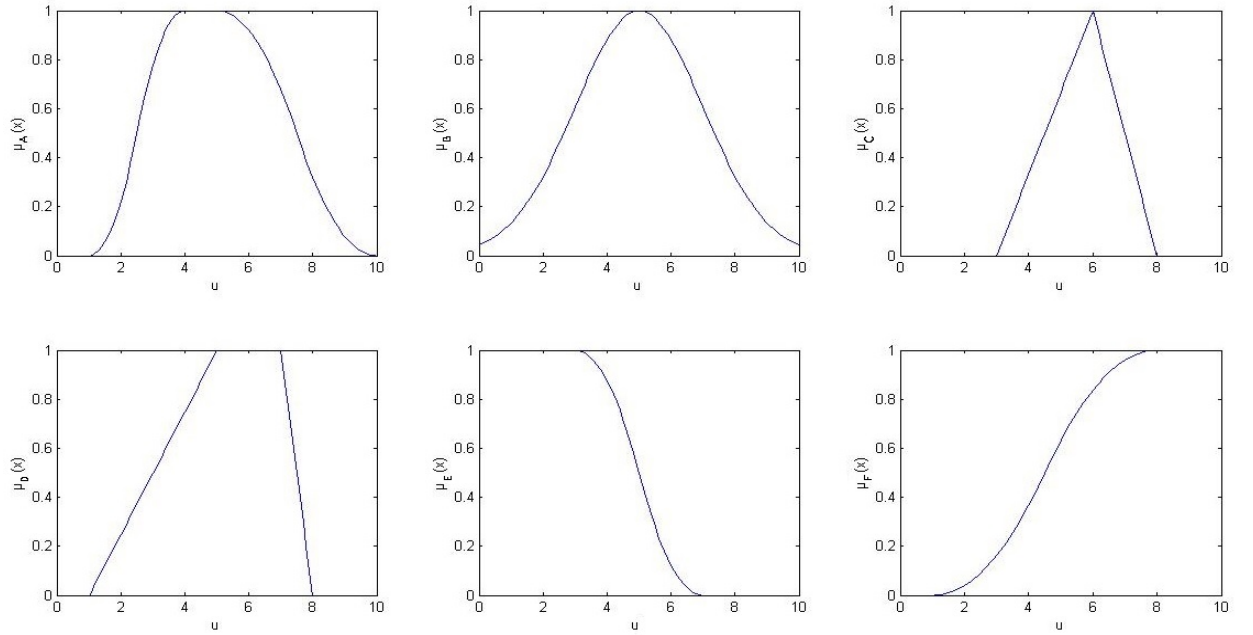


Figura 3: Ejemplos de funciones de pertenencia

En la lógica borrosa podemos encontrar los sistemas de tipo Mamdani y de tipo Sugeno. En el trabajo se emplearán los sistemas borrosos de tipo Takagi - Sugeno - Kang ya que son aplicables al caso en estudio.

1.5.2. SISTEMAS BORROSOS TIPO TAKAGI – SUGENO – KANG (TSK)

Los investigadores japoneses Takagi y Sugeno, con la posterior incorporación de Kang, propusieron un tipo de sistema borroso que, en lugar de emplear reglas completamente lingüísticas, utiliza como consecuente una función de las variables de entrada del sistema. Este tipo de sistemas se conoce como modelos Takagi - Sugeno - Kang (TSK), modelos Takagi - Sugeno (TS) o de forma más simplificada, modelos Sugeno [79].

Una regla típica de un sistema TS tiene la forma:

$$\text{Regla } r: \text{ Si } x_1 \text{ es } A_1^r \text{ y } x_2 \text{ es } A_2^r \text{ y } \dots \text{ y } x_n \text{ es } A_n^r \text{ entonces } y^r = g^r(x)$$

Donde, $i = 1 \dots n$, son las entradas del sistema y y es la salida inferida por la regla r . Los elementos A_i^r son los conjuntos borrosos del antecedente de la regla r , definidos en los universos de discurso de sus entradas asociadas. La consecuencia inferida a partir de la regla se calcula con la función $g^r(x)$, dependiente de las entradas del sistema.

La función consecuente, $g^r(x)$, puede escogerse libremente, aunque los consecuentes más utilizados en este tipo de sistemas son los polinomios de grado 0 y de grado 1. La utilización de polinomios de órdenes mayores o de funciones no polinómicas añaden complejidad al sistema y dificultan su interpretabilidad, por lo que no es muy común su utilización. Si la función consecuente es un polinomio de orden 0, se denomina consecuente afín, y las reglas tienen la forma dada por la ecuación (1); mientras que, si se emplea un consecuente lineal, o de orden 1, las reglas tienen la forma dada en (2). Los elementos $b_0^r, b_1^r, \dots, b_n^r$ son parámetros reales, siendo b_i^r los términos que multiplican a la variable i -ésima del sistema, y b_0^r el término afín de la regla r . El consecuente TSK crea un hiperplano n -dimensional, donde los elementos b_i^r caracterizan el hiperplano, y el término afín se comporta como un offset o desplazamiento de la salida. Por ejemplo, en un sistema de orden, $n = 1$, el consecuente TSK tiene la forma $y^r = b_0^r + b_1^r x_1$, donde $b_1^r x_1$ crea una recta de pendiente b_1^r , y el término afín b_0^r es el valor de la salida en $x_1 = 0$.

$$\text{Si } x_1 \text{ es } A_1^r \text{ y } x_2 \text{ es } A_2^r \text{ y } \dots \text{ y } x_n \text{ es } A_n^r \text{ entonces } y^r = b_0^r \quad (1)$$

$$\text{Si } x_1 \text{ es } A_1^r \text{ y } x_2 \text{ es } A_2^r \text{ y } \dots \text{ y } x_n \text{ es } A_n^r \text{ entonces } y^r = b_0^r + b_1^r x_1 + \dots + b_n^r x_n \quad (2)$$

La salida de un sistema TS se calcula mediante la suma ponderada o el promedio ponderado del efecto individual de todas sus reglas [81]. La suma ponderada, es la suma de los valores obtenidos por la función consecuente, ponderadas por el grado de activación de cada una de las reglas. El promedio ponderado, consiste en dividir la suma ponderada por el sumatorio de las fuerzas de activación de las reglas. Estos métodos de agregación permiten, de forma matemáticamente sencilla, que las reglas que se cumplen en mayor grado afecten más a la salida del sistema que las que se cumplen con una menor calidad. Si la base de reglas está formada por R reglas y w^r es el grado de cumplimiento de la regla r , la salida aplicando la suma ponderada o el promedio ponderado, se obtiene mediante la aplicación de las ecuaciones (3) o (4), respectivamente.

$$y = \sum_{r=1}^R w^r y^r \quad (3)$$

$$y = \frac{\sum_{r=1}^R w^r y^r}{\sum_{r=1}^R w^r} \quad (4)$$

El grado de cumplimiento de cada regla, w^r , se obtendrá mediante la aplicación de un operador de conjunción que se modela mediante una T-norma; normalmente la función mínimo o producto (ecuación 5):

$$w^r = T A_1^r x_1, A_2^r x_2, \dots, A_n^r x_n \quad (5)$$

En este caso es imprescindible algún mecanismo para agregar todas las conclusiones parciales de las reglas en una única salida, utilizándose para ello la suma ponderada o el promedio ponderado.

Estos métodos de agregación permiten, de forma matemáticamente sencilla, que las reglas que se cumplen en mayor grado afecten más a la salida del sistema que las que se cumplen con una menor calidad. El modelo borroso TSK es ampliamente utilizado por sus ventajas con respecto al de Mamdani en los siguientes aspectos:

- La salida de cada una de las reglas es un valor numérico, de forma que no se requiere del desemborronado para generar la salida del sistema.
- Son una poderosa herramienta para el modelado de sistemas complejos y altamente no lineales, ya que son aproximadores universales tanto de la función como de su derivada. Además, si se utiliza como consecuente un polinomio de orden 1 completo; es decir, con el término afín distinto de cero, también se puede aproximar de forma universal la 2da derivada de una función.
- La utilización en los sistemas TSK de un consecuente polinómico permite aproximar funciones con gran precisión y con un número mucho menor de reglas que los sistemas de tipo Mamdani.

CONCLUSIONES PARCIALES

En este capítulo se dieron a conocer aspectos generales relacionados con el principio de funcionamiento de los HAE. Se describieron los procesos de fundición de la cesta y mantenimiento del refractario. Se explican, dentro de las técnicas de inteligencia artificial, los aspectos generales de la lógica borrosa. Lo que permitió arribar a las siguientes conclusiones del capítulo:

- Se adquirieron los conocimientos necesarios referentes a los procesos de fundición de la cesta y del mantenimiento del refractario en los HAE, objeto de este trabajo.
- La forma en que hoy se toman las decisiones para determinar que la cesta está fundida, y realizar el mantenimiento del refractario en el HAE de ACINOX Las Tunas es deficiente ya que es basada solamente en la experiencia del operador.
- Mediante la revisión de algunos conceptos básicos de la lógica borrosa y sus aspectos generales, se determinó que para la solución satisfactoria de uno de los problemas de la investigación es necesario el diseño de sistemas basado en técnicas de inteligencia artificial.

- Las formas empleadas actualmente para la determinación de la cesta fundida y desgaste del refractario aún son insuficientes, por lo que se continúa con su desarrollo y perfeccionamiento.

CAPÍTULO 2. MATERIALES, MÉTODOS Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.

En el presente capítulo se realiza una descripción de los materiales y métodos usados para llevar a cabo los experimentos relacionados con la medición de la variación de la temperatura en las paredes y fondo del HAE de ACINOX Las Tunas. El análisis del comportamiento de la temperatura permitirá obtener un índice del desgaste del refractario. También se detalla cómo se llevó a cabo la selección y procesamiento de las variables a utilizar en los sistemas difusos para la obtención de un índice de cesta fundida. Finalmente se muestran y analizan los resultados obtenidos como resultados de los ensayos analizados.

2.1. MATERIALES Y MÉTODOS.

Se llevó a cabo un programa experimental en el HAE de ACINOX Las Tunas destinado a validar la posibilidad del uso de la medición por termografía infrarroja como herramienta para detectar defectos y mejorar el proceso de producción. Teniendo en cuenta las condiciones del medio, se utilizó la cámara FLIR A655 para grabar imágenes desde una distancia aproximada de 5m del HAE. La misma se ubicó en dos posiciones desde donde se podían hacer tomas del lateral derecho (fases 1 y 3 del HAE), del izquierdo (fases 1 y 2 del HAE) y del fondo del HAE. En la tabla 4 se muestran las características de la cámara.

Tabla 4: Características de la cámara FLIR A655

Resolución de infrarrojos	640 × 480 píxeles
Distancia mínima de enfoque	0.25 m (0.82 ft.)
Longitud focal	24.6 mm (0.97 in.)
Rango espectral	7.5–14 μ m
Rango de temperatura del objeto	• -40°C to +150°C (-40°F to +302°F) • 100 to +650°C (+212 to +1202°F)

Para realizar las mediciones de las variaciones de la temperatura en las paredes y fondo del HAE se consideraron dos etapas. En la primera etapa el revestimiento del refractario era nuevo (figura 4).

a)



b)



c)



Figura 4: Fotos tomadas a las paredes de un nuevo HAE de ACINOX Las Tunas:

a) Fase 1

b) Fase 2

c) Fase 3

En la segunda etapa el horno se estudió cuando había procesado varias coladas, existiendo deterioros visibles en las paredes y este se encontraba próximo al mantenimiento del refractario (figura 5).

a)



b)



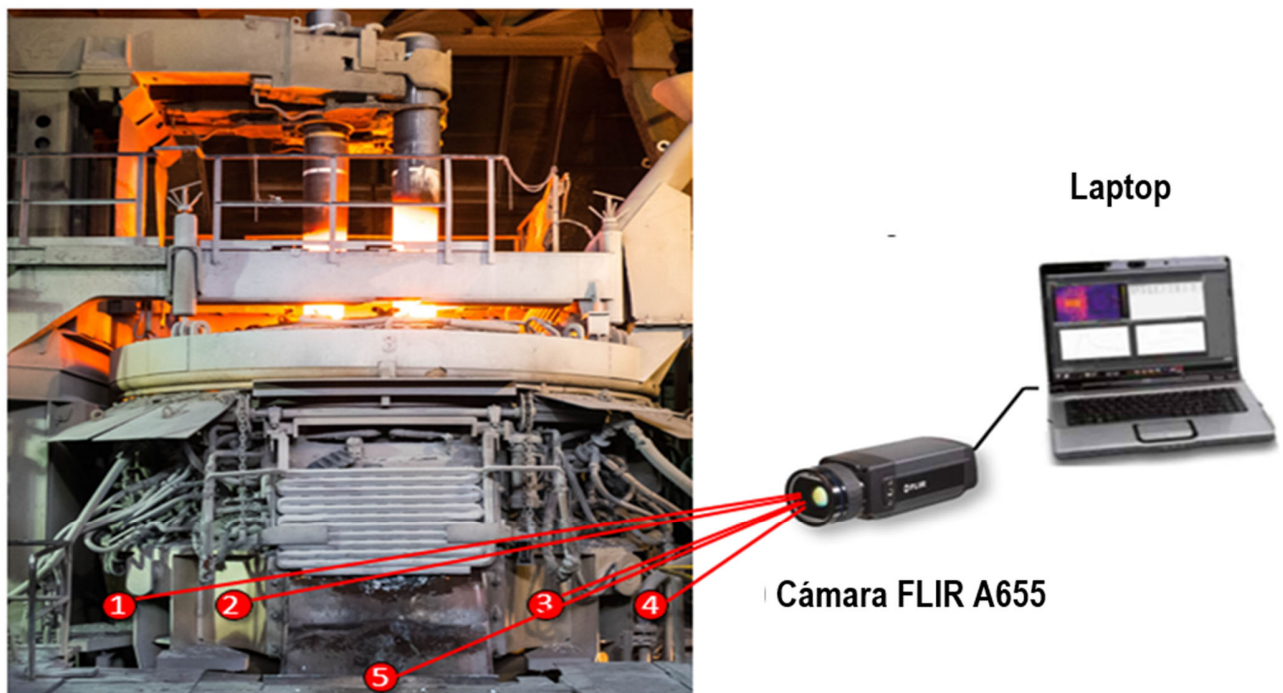
c)



Figura 5: Fotos tomadas a las paredes desgastadas del HAE de ACINOX Las Tunas antes de iniciar el mantenimiento del refractario:

- a) Fase 1
- b) Fase 2
- c) Fase 3

En la figura 6 se muestran las zonas analizadas y el equipamiento con que se realizaron los ensayos:



Zonas de medición de temperatura del HAE

Figura 6: Instalación del equipamiento para los experimentos

En la tabla 5 se detallan los principales aspectos a tener en cuenta durante la realización de los experimentos:

Tabla 5: Principales datos de los experimentos

Etapa	Fecha	Hora	Número de la Colada	Número de la Cesta	Peso de la Cesta(t)
Primera	10/03/2020	00:07:28 - 00:42:49	12745	Cesta 1	30,296
		00:49:31 - 01:10:24		Cesta 2	21,13
		01:13:39 - 01:48:30		Cesta 3	19,05
	11/03/2020	22:03:05 - 22:32:39	12749	Cesta 1	25,83
		22:36:56 - 23:00:30		Cesta 2	24,525
		23:09:37 - 23:48:19		Cesta 3	20,5
	12/03/2020	22:32:25 - 23:00:50	12756	Cesta 1	22,276
		23:04:43 - 23:25:10		Cesta 2	21,17
		23:29:14 - 23:41:12		Cesta 3	16,09
		23:44:41 - 00:19:53		Cesta 4	10,78
	13/03/2020	00:31:39 - 00:51:19	12757	Cesta 1	21,142
		00:54:25 - 01:09:35		Cesta 2	22,34
		01:14:07 - 01:29:56		Cesta 3	16,542
		01:32:42 - 02:02:31		Cesta 4	11,256
Segunda	15/12/2020	09:14:29 - 09:35:38	13576	Cesta 1	29,09
		09:39:42 - 09:56:28		Cesta 2	18
		09:59:50 - 10:14:32		Cesta 3	14,02
		10:22:49 - 10:52:08		Cesta 4	11,29
	16/12/2020	07:59:30 - 08:21:34	13581	Cesta 1	22,22
		08:25:03 - 08:44:35		Cesta 2	19,036
		08:49:07 - 09:02:24		Cesta 3	15,5
		10:56:25 - 11:19:56		Cesta 4	12
	17/12/2020	01:39:49 - 02:02:53	13585	Cesta 1	36,915
		02:21:05 - 02:42:29		Cesta 2	27,918
		11:09:04 - 11:51:38		Cesta 3	8,15
		12:18:58 - 12:42:39	13586	Cesta 1	37,696
		12:49:01 - 13:14:16		Cesta 2	27,144
		13:20:36 - 13:44:09		Cesta 3	7,69

Las informaciones de las imágenes tomadas con la cámara son transferidas a una computadora utilizando el software de gestión asociado FLIR ResearchIR-4. El mismo permite leer los datos históricos almacenados, visualizarlos y exportarlos para ser procesados en Matlab®. En la figura 7 se muestra un diagrama en bloque para el análisis de las imágenes infrarrojas para caracterizar el comportamiento del refractario en HAE y determinar un índice de desgaste del refractario.



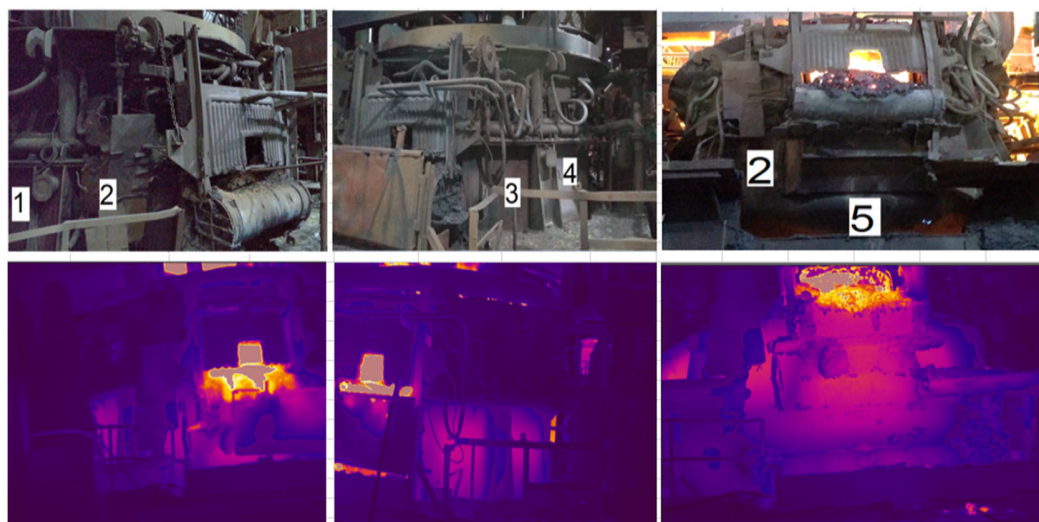
Figura 7: Diagrama en bloque del análisis de las imágenes infrarrojas para determinar un índice de desgaste del refractario.

Tabla 6: Fases que inciden en cada una de las zonas estudiadas en el HAE de ACINOX Las Tunas

Zonas de medición de la temperatura en el HAE	Fases del HAE que inciden en las zonas estudiadas
Zona 1	Fase 2
Zona 2	Fase 1
Zona 3	Fase 1
Zona 4	Fase 3
Zona 5	Fondo

Teniendo en cuenta los datos de la tabla 6 se procesaron las imágenes infrarrojas. Se seleccionaron 10 imágenes por cada zona de medición de la temperatura para los experimentos realizados al inicio y fin de campaña. En la figura 8 se muestra una imagen representativa de la evolución de las temperaturas en cada una de las zonas estudiadas al inicio y fin de campaña.

a)



b)



Figura 8: Evolución de las temperaturas en las paredes del HAE:

a) Horno con 13 coladas;

b) Horno con 158 coladas

La visualización de la evolución temporal de la temperatura en las paredes del HAE estudiadas mostradas en la figura 8, muestra un incremento al pasar de 13 a 158 coladas. Este resultado confirma la posibilidad de realizar estudios basados en el procesamiento digital de las imágenes IR para establecer una correlación entre las temperaturas y el desgaste o espesor del refractario en el HAE.

2.2. SELECCIÓN DE LAS VARIABLES DEL SISTEMA DIFUSO PARA DETERMINAR ICF.

Para la selección adecuada de las variables de entrada es necesario tener en cuenta la conveniencia de utilizar la menor cantidad de variables que sean suficientes para representar en detalles el comportamiento del sistema, evitando complejizar la dimensionalidad del mismo. Para la selección adecuada de estas variables se llevó a cabo

un estudio y análisis detallado del comportamiento en tiempo real del proceso, a partir de la revisión bibliográfica y con la ayuda de los criterios de los especialistas y operarios con mayor experiencia. En la Figura 9 se ilustra un diagrama en bloques con las variables seleccionadas y seguidamente se añaden los argumentos tomados en consideración para dicha selección.

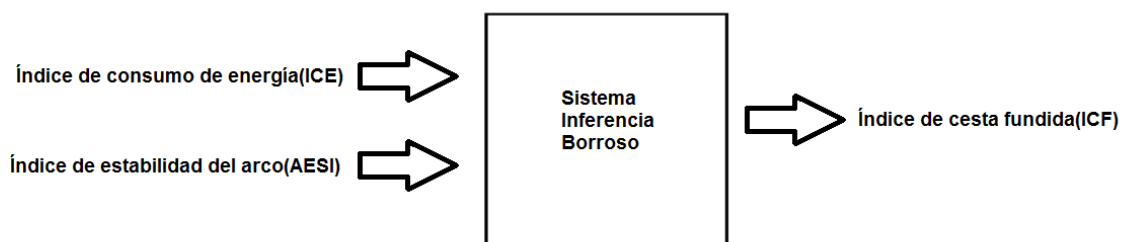


Figura 9: Diagrama en bloques del sistema de inferencia borroso (FIS) para determinar el índice de cesta fundida

El número de cestas de carga de chatarra necesaria para producir una hornada de acero depende principalmente del volumen del horno y de la densidad de la chatarra. Los hornos más modernos están diseñados para funcionar con un mínimo de cestas de cargas. Esto es ventajoso porque la carga es un tiempo muerto donde el horno no tiene potencia, por lo tanto, no se está fundiendo y se producen pérdidas de energía. Minimizar los tiempos muertos ayuda a maximizar la productividad del horno y reducir la energía que se pierde cada vez que el horno abre la bóveda. La mayoría de las operaciones cargan de dos a tres cestas de chatarra por colada y se intenta mezclar la chatarra para cumplir con este requisito.

El proceso de fusión del HAE de ACINOX Las Tunas dura aproximadamente 50 minutos y por lo general se adicionan tres o cuatro cestas hasta completar la capacidad del horno. Teniendo en cuenta que el comportamiento del proceso de fundición de la última cesta es diferente a las anteriores, se utilizará la misma entrada del FIS de la figura 9, modificando la base de conocimiento y la base de reglas en correspondencia con la última cesta o las anteriores.

La chatarra debe ser cargada en la cesta acorde al tamaño y su densidad con el fin de garantizar la rápida formación de un baño líquido en el horno, mientras que también proporciona protección a las paredes laterales y la bóveda del horno, de las radiaciones del arco. En las visitas realizadas a la Acería y específicamente al HAE, durante su proceso de fundición del acero, se logró observar todas las etapas del mismo. En las entrevistas a operadores se verificó que estos llevan, por cada colada realizada, un registro de Reporte de Colada. En el RCA – 010101 se

registra el peso en tonelaje de cada cesta y en el RCA – 010102 se registran datos como el insuflado de oxígeno y el consumo de energía.

La fundición de la cesta se logra mediante el suministro de energía eléctrica y química al interior del horno. En el HAE de ACINOX Las Tunas la energía eléctrica se suministra a través de tres electrodos de grafito y estos datos son mostrados en el HMI de la planta. La energía química se suministra a través de la inyección de Oxígeno y Carbono.

En la revisión bibliográfica realizada en [40] se plantea que los estudios han mostrado que el uso adecuado del oxígeno para las operaciones convencionales de inyección está en el rango de 30 – 40 Nm³/t [82]. Sobre este nivel las pérdidas por rendimiento son excesivas y ya no resulta económico inyectar más oxígeno. Los resultados operativos típicos han dado valores de sustitución de energía para el oxígeno en el rango de 30 – 40 Nm³/t de O₂, con un promedio de 3.5 kWh/Nm³ de O₂ [82-88]. Estos valores muestran que es probable que el Carbono y el Hierro estén reaccionando. Además, algunos estudios han mostrado que el rendimiento del Oxígeno (la cantidad que reacciona con el Carbono), está en el rango del 70 – 80% [88, 89]. A partir de esto datos se calculó la energía química como se indica en la ecuación 6:

$$E_Q = I_O * 2 \quad (6)$$

donde:

E_Q, es la Energía Química

I_O, es la Inyección de Oxígeno

2, es un coeficiente empírico de 2 kWh/Nm³ de O₂ obtenido a partir de la experiencia en esta planta y otras de hornos con características similares ([40])

Con respecto al consumo de energía, en investigaciones recientes se han centrado principalmente en la energía consumida total (eléctrica y química) [90-93] y la energía consumida individual (eléctrica o química)[94, 95]. Partiendo de esto en el SCADA de la Acería se implementó la ecuación 7 para obtener los datos de la Energía Total Consumida.

$$E_{TC} = E_E + E_Q \quad (7)$$

donde:

E_{TC}, es la energía total consumida

E_E, es la energía eléctrica.

E_Q, es la energía química.

Teniendo en cuenta los datos anteriores se calculó el Índice de Consumo de Energía como se indica en la ecuación 8:

$$ICE = \frac{E_{TC}}{P_C} \quad (8)$$

donde:

E_{TC} , es la energía total consumida.

P_C , es el peso de la cesta.

Una variable novedosa que se incluyó, se basa en la definición de una propuesta de nuevo índice de estabilidad del arco que utiliza la señal acústica (AESIHAE) [96] teniendo en cuenta los resultados de la caracterización del ruido del HAE como resultado de unas de las investigaciones de este proyecto. Para el establecimiento del índice de estabilidad se seleccionaron tres condiciones relacionadas con las etapas de inestable, semi - estable y estable. El índice propuesto permite establecer la estabilidad global del proceso de fundición en el HAE. Sin embargo, ese índice de estabilidad es resultado del efecto de cada uno de los arcos de cada fase. Si tenemos en cuenta que cada uno de los arcos puede operar de forma asimétrica, entonces en el caso de los HAE trifásicos es posible obtener el efecto de cada uno de los tres arcos en el índice de estabilidad global AESIHAE. Para ello es necesario modificar dicho índice teniendo en cuenta las señales eléctricas de tensión (U) y corriente del arco (I). En este caso el índice de estabilidad AESIHAE se descompone en tres componentes, cada una de ellas asociada al efecto que induce esa fase en la estabilidad global del proceso en el HAE, resultando la Ecuación 9:

$$AESI_{HAE} = \frac{AESI_{HAE} \cdot Z_1}{Z_1 + Z_2 + Z_3} + \frac{AESI_{HAE} \cdot Z_2}{Z_1 + Z_2 + Z_3} + \frac{AESI_{HAE} \cdot Z_3}{Z_1 + Z_2 + Z_3}, \quad (9)$$

dónde: Z1, Z2 y Z3 son las impedancias del arco en cada fase.

Teniendo en cuenta lo antes descrito, en la tabla 7 se resumen las variables de entrada al sistema seleccionadas con su clasificación y rangos de trabajo.

Tabla 7: Variables de entrada al Editor de Sistemas de Inferencia Difusa

Variable de entrada	Clasificación	Rango de Trabajo
Índice de Consumo de Energía(ICE)	Discreta	0 – 3.5 (MWh)
Índice de Estabilidad del Arco(AESI_HAE)	Discreta	0 – 12 ($Pa^2 \cdot s$)

Como variable de salida del sistema se selecciona la mostrada en la tabla 8, porque la obtención de un índice de Cesta Fundida ofrece una solución a una de las problemáticas de la investigación.

Tabla 8: Variable de Salida del Editor de Sistemas de Inferencia Difusa

Variable de Salida	Clasificación	Rango de Trabajo
Índice de Cesta Fundida(ICF)	Continua	0 – 100%

Una vez definidas las variables de entrada y salida del Sistema Difuso se realizó la identificación y recopilación de los datos correspondiente a cada variable, lo cual se describe en la siguiente sección.

2.3. IDENTIFICACIÓN, RECOPIACIÓN Y PROCESAMIENTO DE LOS DATOS.

Para realizar la propuesta de diseños de los sistemas difusos se recopilaron todos los datos correspondientes a las variables seleccionadas. Para la obtención de los datos lo primero que se necesitó fue definir en qué forma estaban disponibles. En el caso de estudio, los datos del número y peso de la cesta, de la inyección de oxígeno y de la corriente eléctrica, fueron copiados de los expedientes de las coladas. Estos se encuentran archivados en el departamento del Grupo Integrado de Gestión. Como una de las variables de entrada del sistema es el índice de estabilidad del arco eléctrico ($AESI_{HAE}$) y este fue previamente determinado como parte de uno de los resultados de este proyecto de investigación, se seleccionaron los datos de las coladas correspondientes a la misma fecha en que se realizaron los experimentos para la obtención del $AESI_{HAE}$. Los datos fueron registrados en la tabla 9. En el caso de la energía química se obtuvo mediante (6). Mientras que la variable de la energía total consumida se obtuvo mediante (7).

Tabla 9: Datos de las coladas de los experimentos

FECHA	HORA	# DE LA COLADA	# DE LA CESTA	PESO DE LA CESTA(t)	ENERGÍA ELÉCTRICA (MWh)	OXÍGENO (Nm ³)	ENERGÍA QUÍMICA (MWh)	ENERGÍA TOTAL CONSUMIDA (MWh)
10/03/2020	00:07:28 - 00:42:49	12745	Cesta 1	30,296	12,110	160,000	0,320	12,430
	00:49:31 - 01:10:24		Cesta 2	21,130	7,220	304,000	0,608	7,828
	01:13:39 - 01:48:30		Cesta 3	19,050	13,390	209,000	0,418	13,808
11/03/2020	22:03:05 - 22:32:39	12749	Cesta 1	25,830	9,780	356,000	0,712	10,492
	22:36:56 - 23:00:30		Cesta 2	24,525	7,890	314,000	0,628	8,518
	23:09:37 - 23:48:19		Cesta 3	20,500	19,410	154,000	0,308	19,718
12/03/2020	22:32:25 - 23:00:50	12756	Cesta 1	22,276	8,700	401,000	0,802	9,502
	23:04:43 - 23:25:10		Cesta 2	21,170	7,100	284,000	0,568	7,668
	23:29:14 - 23:41:12		Cesta 3	16,090	3,810	192,000	0,384	4,194
	23:44:41 - 00:19:53		Cesta 4	10,780	14,720	202,000	0,404	15,124
13/03/2020	00:31:39 - 00:51:19	12757	Cesta 1	21,142	6,320	287,000	0,574	6,894
	00:54:25 - 01:09:35		Cesta 2	22,340	5,200	180,000	0,360	5,560
	01:14:07 - 01:29:56		Cesta 3	16,542	5,570	215,000	0,430	6,000
	01:32:42 - 02:02:31		Cesta 4	11,256	13,850	137,000	0,274	14,124
15/12/2020	09:14:29 - 09:35:38	13576	Cesta 1	29,090	7,460	203,000	0,406	7,866
	09:39:42 - 09:56:28		Cesta 2	18,000	6,010	221,000	0,442	6,452
	09:59:50 - 10:14:32		Cesta 3	14,020	5,290	188,000	0,376	5,666
	10:22:49 - 10:52:08		Cesta 4	11,290	12,940	250,000	0,500	13,440
16/12/2020	07:59:30 - 08:21:34	13581	Cesta 1	22,220	7,020	214,000	0,428	7,448
	08:25:03 - 08:44:35		Cesta 2	19,036	7,080	200,000	0,400	7,480
	08:49:07 - 09:02:24		Cesta 3	15,500	4,710	131,000	0,262	4,972
	10:56:25 - 11:19:56		Cesta 4	12,000	11,360	326,000	0,652	12,012
17/12/2020	01:39:49 - 02:02:53	13585	Cesta 1	36,915	9,240	341,000	0,682	9,922
	02:21:05 - 02:42:29		Cesta 2	27,918	8,240	341,000	0,682	8,922
	11:09:04 - 11:51:38		Cesta 3	8,150	23,680	729,000	1,458	25,138
	12:18:58 - 12:42:39	13586	Cesta 1	37,696	8,890	571,000	1,142	10,032
	12:49:01 - 13:14:16		Cesta 2	27,144	10,050	152,000	0,304	10,354
	13:20:36 - 13:44:09		Cesta 3	7,690	24,980	801,000	1,602	26,582

Para la obtención del índice de erosión refractaria (RE) y del índice de desgaste refractario (RWI), mediante fórmula, se identificó cada variable de la fórmula en cuestión y en qué forma estaban disponibles. En los historiales del SCADA de la Acería aparecen registrados los datos de las potencias activas y los valores de tensión de los arcos para el caso del índice RE y los datos de las corrientes de los arcos para el caso del índice RWI. La distancia entre el arco y la pared del horno se determinó a partir de los planos del HAE. Los datos de estas variables fueron

exportados a Excel. Luego se trabajó en la identificación de los datos correspondientes a las coladas que coincidían con los días e intervalos de tiempo de los experimentos, quedando registrados en la tabla 10 para el índice RE y en la tabla 11 para el índice RWI, respectivamente.

El valor del índice de erosión refractaria (para las tres fases) se obtuvo mediante fórmula (1) al igual que el índice de desgaste de refractario (para las tres fases) mediante fórmula (3).

Tabla 10: Datos de las variables de la fórmula del índice RE

Fecha	Hora	#	#	Potencia del Arco (MW)	Voltaje del Arco Fase 1 (V)	Voltaje del Arco Fase 2 (V)	Voltaje del Arco Fase 3 (V)	RE	RE	RE
		Colada	Cesta					Fase 1	Fase 2	Fase 3
10/03/2020	00:07:28 - 00:42:49	12745	Cesta 1	20,65	422	312	288	8714	6443	5947
	00:49:31 - 01:10:24		Cesta 2	20,76	375	312	289	7785	6477	6000
	01:13:39 - 01:48:30		Cesta 3	23,13	363	321	301	8396	7425	6962
11/03/2020	22:03:05 - 22:32:39	12749	Cesta 1	19,24	417	312	291	8023	6003	5599
	22:36:56 - 23:00:30		Cesta 2	20,15	383	329	285	7717	6629	5743
	23:09:37 - 23:48:19		Cesta 3	24,42	411	315	300	10037	7692	7326
12/03/2020	22:32:25 - 23:00:50	12756	Cesta 1	21,8	334	283	254	7281	6169	5537
	23:04:43 - 23:25:10		Cesta 2	20,14	307	274	251	6183	5518	5055
	23:29:14 - 23:41:12		Cesta 3	18,04	282	253	234	5087	4564	4221
	23:44:41 - 00:19:53		Cesta 4	24,86	310	299	285	7707	7433	7085
13/03/2020	00:31:39 - 00:51:19	12757	Cesta 1	22,26	339	272	251	7546	6055	5587
	00:54:25 - 01:09:35		Cesta 2	20,01	340	303	268	6803	6063	5363
	01:14:07 - 01:29:56		Cesta 3	19,67	291	275	248	5724	5409	4878
	01:32:42 - 02:02:31		Cesta 4	25	316	294	291	7900	7350	7275
15/12/2020	09:14:29 - 09:35:38	13576	Cesta 1	21,19	350	310	287	7417	6569	6082
	09:39:42 - 09:56:28		Cesta 2	21,51	339	302	283	7292	6496	6087
	09:59:50 - 10:14:32		Cesta 3	21,59	324	299	285	6995	6455	6153
	10:22:49 - 10:52:08		Cesta 4	26,2	355	299	296	9301	7834	7755
16/12/2020	07:59:30 - 08:21:34	13581	Cesta 1	19,15	353	335	329	6760	6415	6300
	08:25:03 - 08:44:35		Cesta 2	21,75	343	300	289	7460	6525	6286
	08:49:07 - 09:02:24		Cesta 3	21,31	318	290	283	6777	6180	6031
	10:56:25 - 11:19:56		Cesta 4	24,42	345	291	286	8425	7106	6984
17/12/2020	01:39:49 - 02:02:53	13585	Cesta 1	24,06	327	316	302	7868	7603	7266
	02:21:05 - 02:42:29		Cesta 2	23,08	335	311	293	7732	7178	6762
	11:09:04 - 11:51:38		Cesta 3	28,98	330	327	316	9563	9476	9158
	12:18:58 - 12:42:39	13586	Cesta 1	22,6	331	313	302	7481	7074	6825
	12:49:01 - 13:14:16		Cesta 2	23,88	342	315	298	8167	7522	7116

Tabla 11: Datos de las variables de la fórmula del índice RWI

Fecha	Hora	# Colada	# Cesta	larc Fase 1 (KA)	larc Fase 2 (KA)	larc Fase 3(KA)	Uarc Fase 1(V)	Uarc Fase 2(V)	Uarc Fase 3(V)	Índice Desgaste Refractario(RWI) Fase 1	Índice Desgaste Refractario(RWI) Fase 2	Índice Desgaste Refractario(RWI) Fase 3
10/03/2020	00:07:28 - 00:42:49	12745	Cesta 1	28,48	28,90	19,50	422	312	288	4609	2557	1470
	00:49:31 - 01:10:24		Cesta 2	27,48	28,30	22,51	375	312	289	3512	2503	1709
	01:13:39 - 01:48:30		Cesta 3	28,03	32,33	27,25	363	321	301	3356	3027	2244
11/03/2020	22:03:05 - 22:32:39	12749	Cesta 1	26,54	26,71	18,77	417	312	291	4194	2363	1444
	22:36:56 - 23:00:30		Cesta 2	27,01	27,00	22,02	383	329	285	3601	2656	1625
	23:09:37 - 23:48:19		Cesta 3	28,09	29,95	22,66	411	315	300	4312	2701	1853
12/03/2020	22:32:25 - 23:00:50	12756	Cesta 1	25,23	26,34	24,72	334	283	254	2558	1917	1449
	23:04:43 - 23:25:10		Cesta 2	25,96	26,06	22,93	307	274	251	2223	1778	1313
	23:29:14 - 23:41:12		Cesta 3	24,98	24,94	22,77	282	253	234	1805	1451	1133
	23:44:41 - 00:19:53		Cesta 4	28,80	28,34	27,02	310	299	285	2515	2302	1994
13/03/2020	00:31:39 - 00:51:19	12757	Cesta 1	25,11	25,53	25,51	339	272	251	2622	1716	1461
	00:54:25 - 01:09:35		Cesta 2	25,27	25,20	23,92	340	303	268	2655	2102	1561
	01:14:07 - 01:29:56		Cesta 3	26,12	25,48	23,88	291	275	248	2010	1751	1335
	01:32:42 - 02:02:31		Cesta 4	28,36	28,84	26,82	316	294	291	2574	2265	2064
15/12/2020	09:14:29 - 09:35:38	13576	Cesta 1	24,80	29,28	29,14	350	310	287	2761	2557	2181
	09:39:42 - 09:56:28		Cesta 2	25,31	29,32	29,64	339	302	283	2643	2430	2157
	09:59:50 - 10:14:32		Cesta 3	26,19	29,59	29,11	324	299	285	2498	2404	2149
	10:22:49 - 10:52:08		Cesta 4	29,12	34,08	34,27	355	299	296	3335	2769	2729
16/12/2020	07:59:30 - 08:21:34	13581	Cesta 1	23,74	22,73	21,86	353	335	329	2688	2318	2150
	08:25:03 - 08:44:35		Cesta 2	25,58	29,20	29,27	343	300	289	2735	2388	2222
	08:49:07 - 09:02:24		Cesta 3	26,14	29,28	29,02	318	290	283	2402	2238	2112
	10:56:25 - 11:19:56		Cesta 4	27,50	32,59	33,02	345	291	286	2975	2508	2454
17/12/2020	01:39:49 - 02:02:53	13585	Cesta 1	28,37	30,55	30,96	327	316	302	2757	2772	2566
	02:21:05 - 02:42:29		Cesta 2	27,75	30,39	30,70	335	311	293	2830	2671	2395
	11:09:04 - 11:51:38		Cesta 3	32,93	33,39	33,73	330	327	316	3259	3245	3061
	12:18:58 - 12:42:39	13586	Cesta 1	27,39	29,61	30,07	331	313	302	2727	2636	2492
	12:49:01 - 13:14:16		Cesta 2	27,44	30,47	30,75	342	315	298	2917	2748	2482
	13:20:36 - 13:44:09		Cesta 3	31,58	32,71	33,07	324	305	319	3013	2765	3058

2.4. MODELADO Y SIMULACIÓN DE LOS SISTEMAS DIFUSOS.

Utilizando la herramienta de trabajo de Matlab®, para determinar el ICF, se diseñaron los FIS tipo Takagi – Sugeno de Orden 2. Los modelos borrosos Takagi-Sugeno (TS), se caracterizan por la generación de regiones borrosas en el espacio de las variables que aparecen en los antecedentes de las reglas. Por otro lado, los consecuentes de las reglas vienen descritos por funciones reales en lugar de proposiciones borrosas. Los modelos TS combinan una descripción global del sistema mediante la base de reglas, y una aproximación local mediante las funciones empleadas en los diferentes consecuentes.

Para el caso de estudio en un momento inicial la variable de entrada ICE tiene un valor determinante para una correcta simulación del ICF. Esta variable crece a medida que el ICF alcanza el 100 % y el operador puede decidir que la cesta esta fundida. No tiene el mismo comportamiento para otros intervalos de tiempo donde el valor determinante lo tiene la variable de entrada AESI. Esta variable disminuye a medida que el ICF alcanza el 100%. Teniendo en cuenta que las primeras cestas que se adicionan al HAE no tienen el mismo comportamiento que para

las últimas cestas se diseñaron dos FIS como se muestra en la figura 10 y 11.

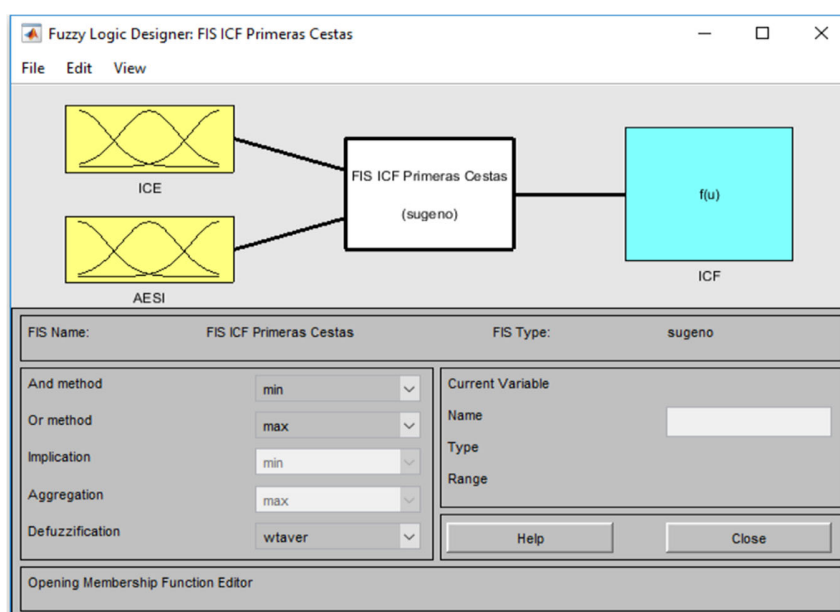


Figura 10: FIS ICF Primeras Cestas

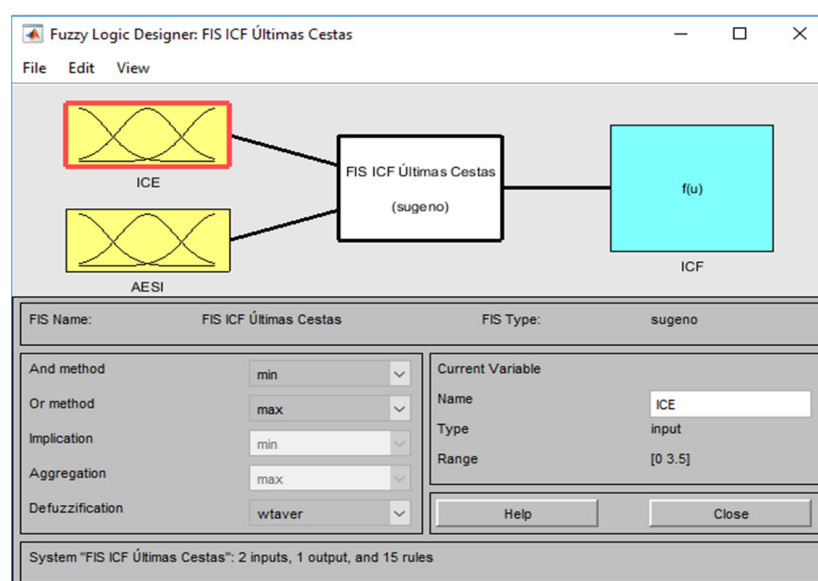


Figura 11: FIS ICF Última Cesta

2.4.1. SELECCIÓN DE UNIVERSOS DE DISCURSOS Y SUBCONJUNTOS DIFUSOS.

Para la selección de los universos de discurso y los subconjuntos borrosos, se tuvo en cuenta el comportamiento de las 2 variables de entrada y la de salida, a partir del análisis de los datos y los criterios de especialistas y operarios. En la tabla 12 se resumen los valores que toman los universos de discursos y subconjuntos borrosos respectivamente para las primeras y últimas cestas.

Tabla 12: Universos de discursos y subconjuntos borrosos: a) FIS ICF Primeras Cestas y b) FIS ICF Últimas Cestas

a)

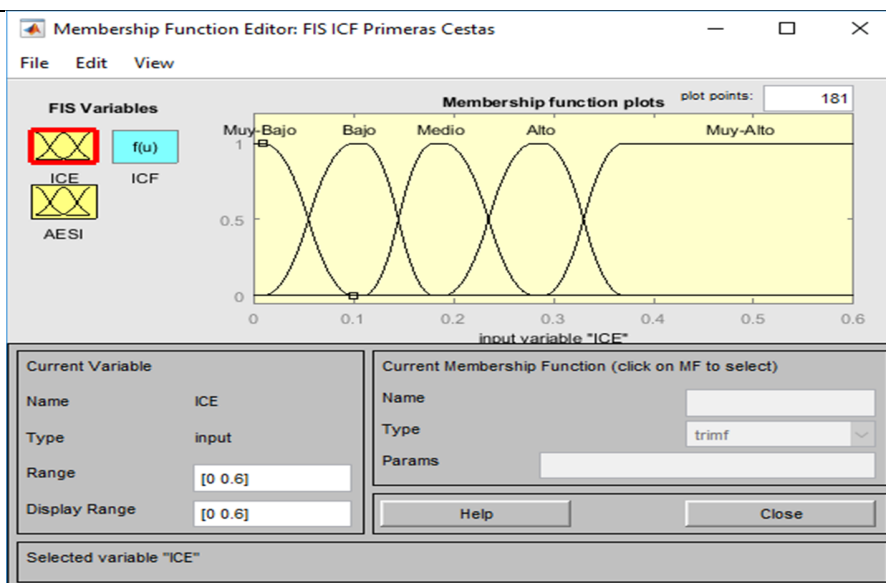
Universo Discurso					
Índice de consumo de Energía (MWh/t)		Índice de Estabilidad del Arco (AESI_HAE)		Índice de Cesta Fundida (%)	
Menor	Mayor	Menor	Mayor	Menor	Mayor
0,24	0,42	0	10		
0	0,6	0	12	0	100
Subconjuntos Difusos					
0,01 --- 0,1	Muy Bajo				
0,11 --- 0,18	Bajo	0.3 --- 0.8	Estable	0 --- 40	Inicio
0,19 ---- 0,28	Medio	4 ---- 5	Semiestable	30 ---- 85	Mediado
0,29----- 0,37	Alto	5 ----- 12	Inestable	75 ----- 100	Final
0,37----- 0,6	Muy Alto				

b)

Universo Discurso					
Índice de consumo de Energía (MWh/t)		Índice de Estabilidad del Arco (AESI_HAE)		Índice de Cesta Fundida (%)	
Menor	Mayor	Menor	Mayor	Menor	Mayor
0,72	3,456	0	10		
0	3,5	0	12	0	100
Subconjuntos Difusos					
0.4 --- 0,45	Muy Bajo				
0,8 --- 0,9	Bajo	0,6 --- 0,7	Estable	0 --- 40	Inicio
1,5 ---- 1,6	Medio	4 ---- 5	Semiestable	30 ---- 85	Mediado
2,5----- 2,6	Alto	5 ----- 12	Inestable	75 ----- 100	Final
2,6----- 3,5	Muy Alto				

En la figura 12 y 13 se muestran los Subconjuntos Borrosos para FIS ICF Primeras Cestas y FIS ICF Última Cesta respectivamente.

a)



b)

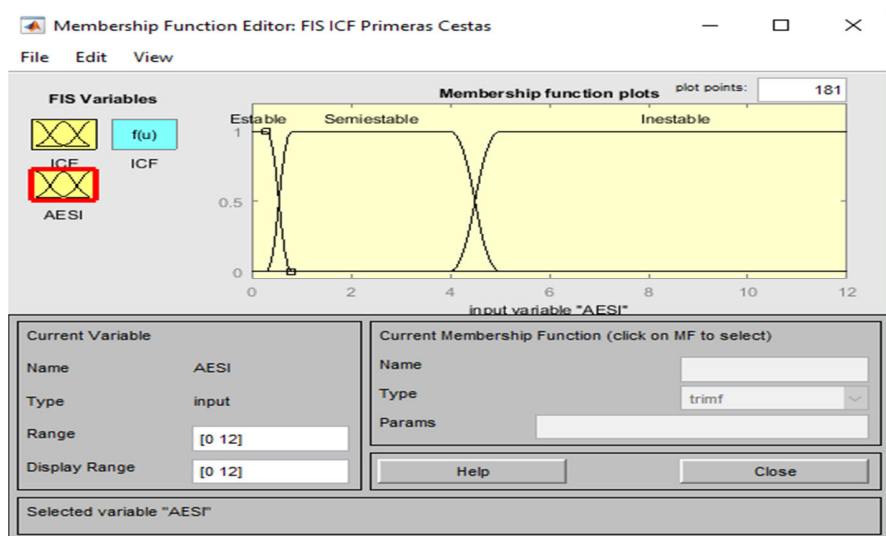
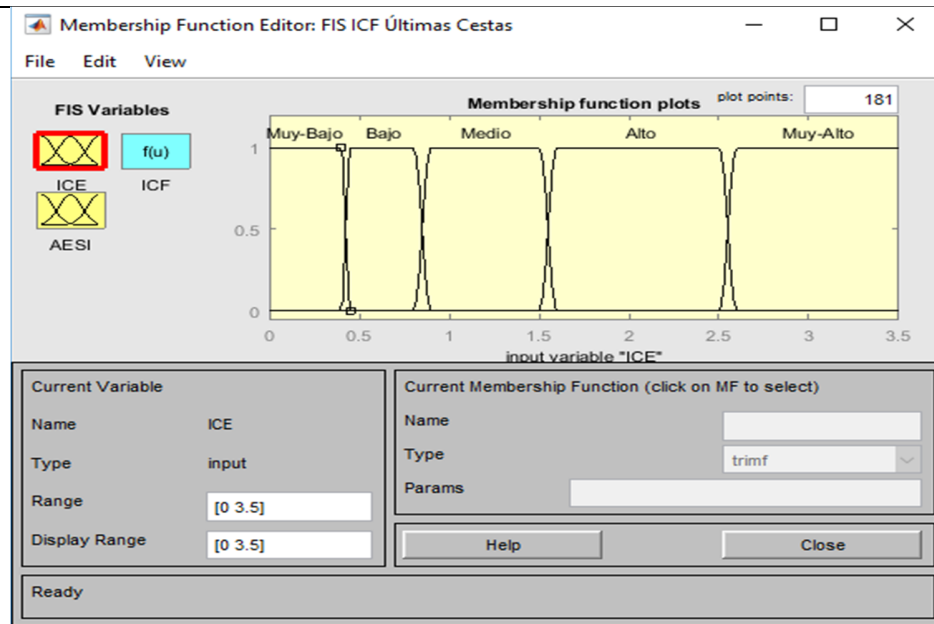


Figura 12: Subconjuntos Borrosos para FIS ICF Primeras Cestas: a) Variable de entrada ICE y b) Variable de entrada AESI

a)



b)

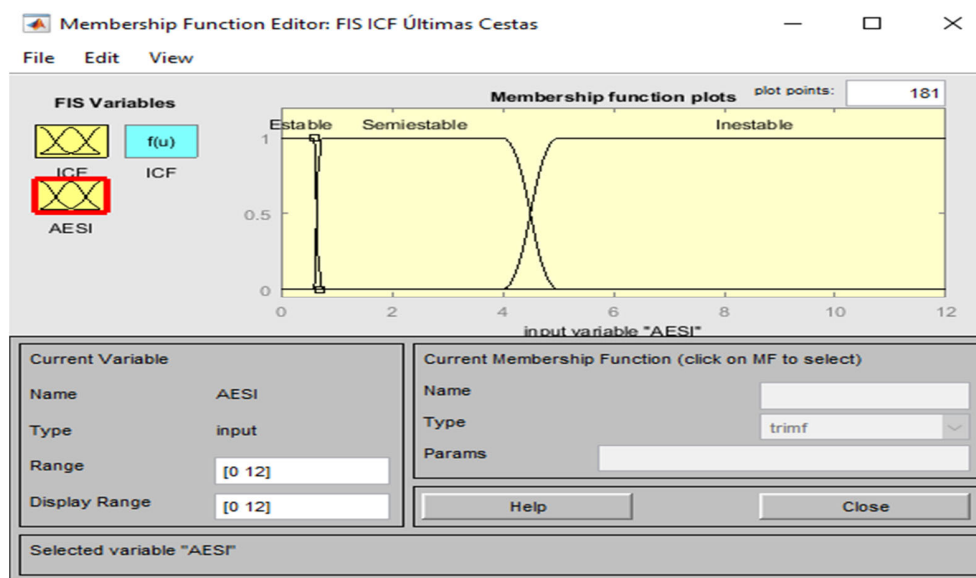


Figura 13: Subconjuntos Borrosos para FIS ICF Última Cesta: a) Variable de entrada ICE y b) Variable de entrada AESI

2.4.2. DISEÑO DE LA BASE DE REGLAS.

Luego de definir los universos de discursos y subconjuntos borrosos se desarrolló la base de conocimientos mediante la utilización de reglas. En la tabla 13 y 14 se desarrolló la base de reglas para las primeras y última cesta y en la figura 14 se muestra el conjunto de reglas teniendo en cuenta todas las posibles variantes.

Tabla 13: Base de reglas para los FIS ICF Primeras Cestas

Primeras Cestas			
Regla No.	X1: Índice de consumo de Energía (MWh/t)	X2: Índice de Estabilidad del Arco (AESI_HAE)	ICF: Índice de Cesta Fundida(%)
1	Muy Bajo	Inestable	[170 0 0]
2	Muy Bajo	Semiestable	[170 0 0]
3	Muy Bajo	Estable	[170 0 0]
4	Bajo	Inestable	[170 -0.1 17]
5	Bajo	Semiestable	[170 -0.1 17]
6	Bajo	Estable	[170 -0.1 17]
7	Medio	Inestable	[170 -0.2 25]
8	Medio	Semiestable	[170 -0.2 25]
9	Medio	Estable	[170 -0.2 25]
10	Alto	Inestable	[170 -2 35]
11	Alto	Semiestable	[170 -2 35]
12	Alto	Estable	[170 -2 35]
13	Muy Alto	Inestable	[170 -5 45]
14	Muy Alto	Semiestable	[170 -5 45]
15	Muy Alto	Estable	[170 -5 45]

Tabla 14: Base de reglas para los FIS ICF Última Cesta

Última Cesta			
Regla No.	X1: Índice de consumo de Energía (MWh/t)	X2: Índice de Estabilidad del Arco (AESI_HAE)	ICF: Índice de Cesta Fundida(%)
1	Muy Bajo	Inestable	[120 0 0]
2	Muy Bajo	Semiestable	[120 0 0]
3	Muy Bajo	Estable	[120 0 0]
4	Bajo	Inestable	[110 -0.1 1]
5	Bajo	Semiestable	[110 -0.1 1]
6	Bajo	Estable	[110 -0.1 1]
7	Medio	Inestable	[100 -0.2 2]
8	Medio	Semiestable	[100 -0.2 2]
9	Medio	Estable	[100 -0.2 2]
10	Alto	Inestable	[90 -2 3]
11	Alto	Semiestable	[90 -2 3]
12	Alto	Estable	[90 -2 3]
13	Muy Alto	Inestable	[85 -5 4]
14	Muy Alto	Semiestable	[85 -5 4]
15	Muy Alto	Estable	[85 -5 4]

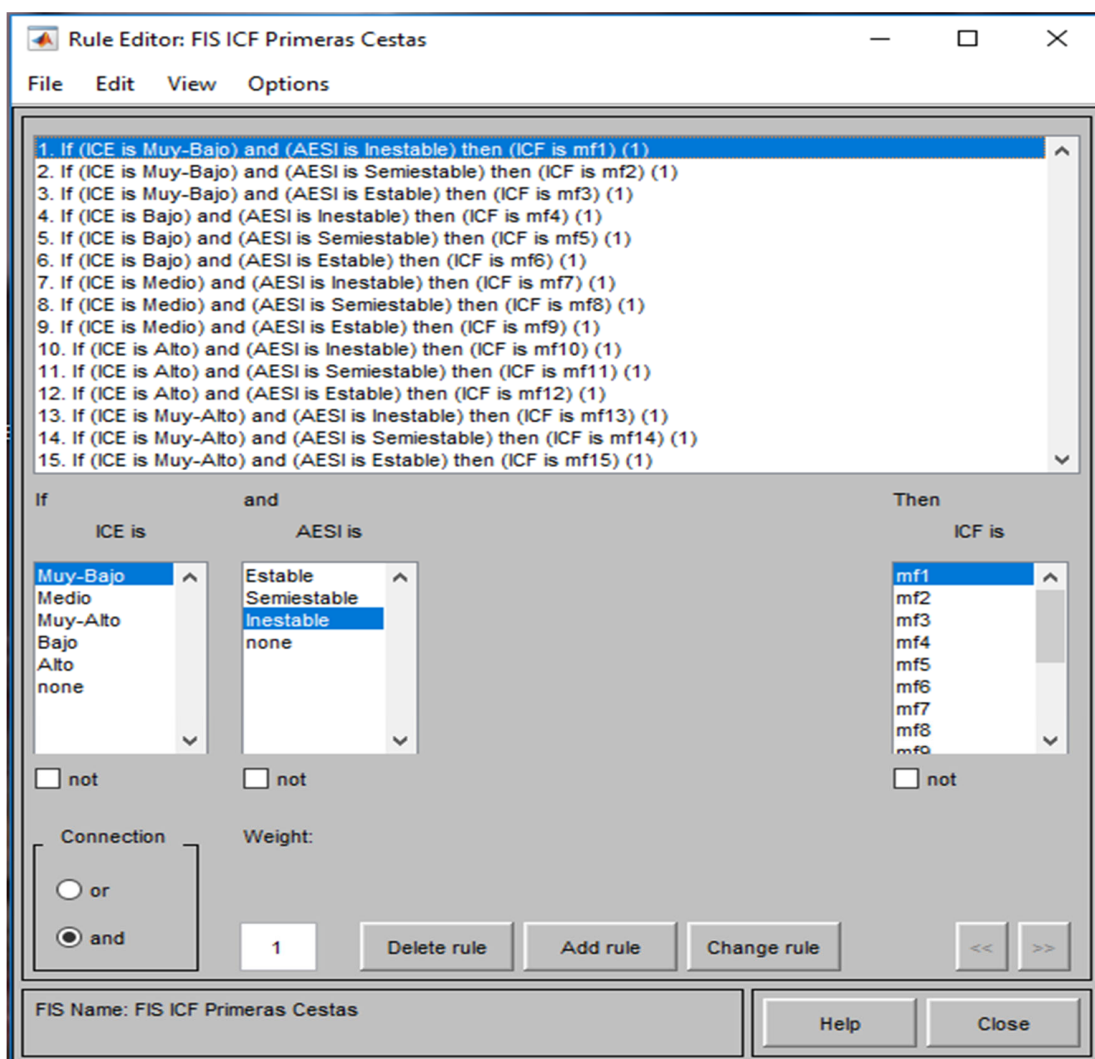


Figura 14: Conjuntos de reglas para determinar ICF

2.4.3. MODELO SIMULINK DEL SISTEMA FIS PROPUESTO.

Luego de diseñar los FIS se diseñó el modelo Simulink (figura 15). Se simularon 3 experimentos. Se cargó la base de datos para cada uno y se obtuvieron los resultados.

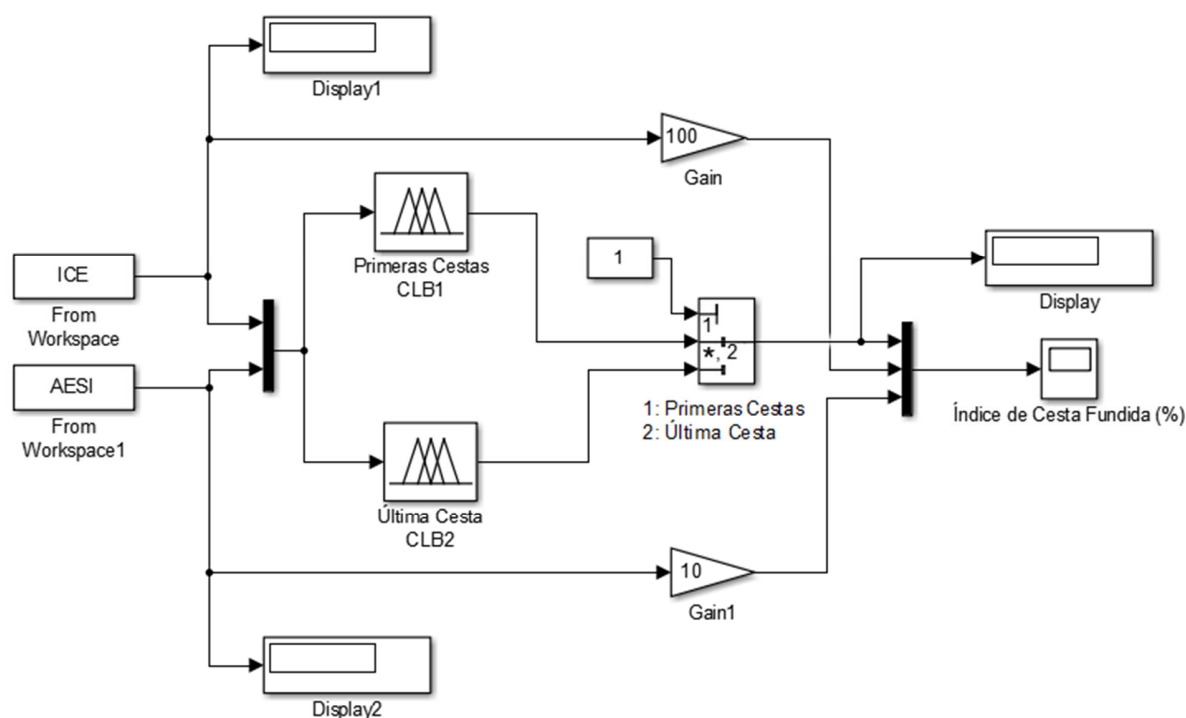


Figura 15: Modelo Simulink del sistema FIS Propuesto.

2.5. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.

2.5.1. RESULTADOS PARA LA OBTENCIÓN DEL ÍNDICE DE DESGASTE DEL REFRACTARIO.

En la industria metalúrgica, para la producción de acero a nivel internacional, desempeña un papel importante el empleo de hornos de arco eléctrico (HAE) de corriente alterna (CA) trifásica. Uno de los parámetros que hay que comprobar en los hornos es la erosión de las paredes. Ésta se debe a la alta temperatura, a la erosión química, a la socavación física de la escoria y del metal caliente y al movimiento constante de la escoria debido al paso de grandes corrientes eléctricas. Como resultado, se espera una erosión desigual de la pared dentro del horno. La campaña total de un alto horno depende del rendimiento del revestimiento refractario. La durabilidad del revestimiento refractario depende de las tensiones experimentadas por el mismo, que son de dos tipos: tensiones físicas y tensiones térmicas. Se llevó a cabo el procesamiento de imágenes térmicas infrarrojas para evaluar el espesor y desgaste erosivo del refractario en horno de arco eléctrico trifásico de CA.

Para determinar las temperaturas promedio por las zonas, en los experimentos realizados se hicieron varias mediciones de la variación de la temperatura en las 5 zonas seleccionadas del HAE de ACINOX Las Tunas a través de las imágenes infrarrojas. A estas imágenes se le determinó la máxima temperatura y luego se calculó el valor promedio. En la tabla 15 se muestran las distribuciones de las temperaturas promedios en la pared exterior del HAE.

Tabla 15: Distribución de las temperaturas promedio por zonas

Fecha	Número Total de coladas	Temperatura Zona 1	Temperatura Zona 2	Temperatura Zona 3	Temperatura Zona 4	Temperatura Zona 5
11/03/2020	13	184,4	197,6	196,7	198	179,1
15/12/2020	158	395,5	391,7	355,6	344,3	335,2
dT		211,1	194,1	158,9	146,3	156,1

En la figura 16 se muestra la influencia que tiene el número de coladas en las variaciones de la temperatura de las paredes del HAE. Las menores temperaturas se registran en la zona 5 del fondo del HAE y está asociado a que el fondo del horno tiene una doble capa de refractarios por lo que existe un mayor espesor del refractario y el nivel de desgaste es menor. Las mayores temperaturas se aprecian en las zonas 1 y 2 del horno y está asociado a las fases o posición de los electrodos en el HAE. En el horno existen zonas como la 3 y 4 donde influye una sola fase y aquí el desgaste es menor pero existen zonas como la 1 y 2 donde influyen dos fases y como aquí el desgaste es mayor, las temperaturas son mayores.

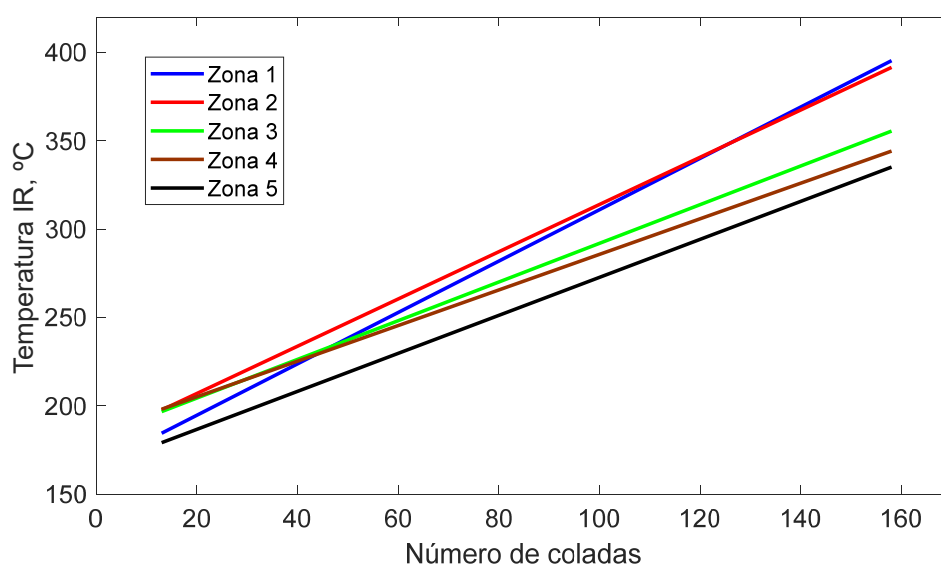


Figura 16: Influencia del número de coladas en las variaciones de la temperatura de pared exterior del HAE.

En la figura 17 se muestra la diferencia de temperaturas en las paredes externas del HAE para inicio y fin de campaña. Esta da un indicador de transferencia de calor al exterior, donde, menor dT menor desgaste del refractario y mayor dT, refractario más erosionado.

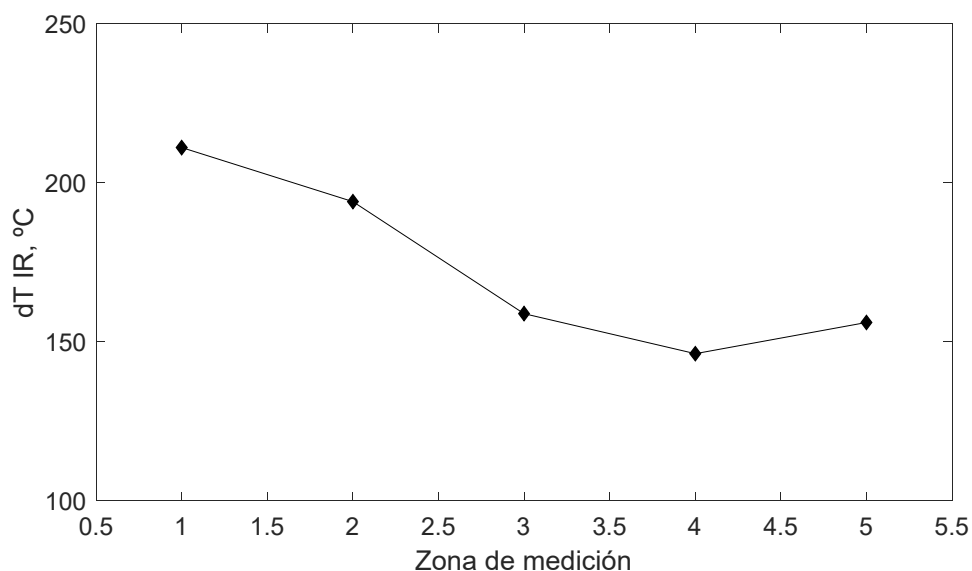


Figura 17: Diferencia de temperaturas en las paredes externas del HAE para inicio y fin de campaña.

En las tablas 16 y 17 se muestran los valores de los índices RE Y RWI respectivamente. Estos índices dan una medida de cómo ocurre el desgaste del refractario en el HAE. Las zonas que están afectadas por dos fases tienen valores superiores a las zonas que están afectadas por una sola fase.

Tabla 16: Índice de erosión refractaria (RE)

Fecha	#Colada	# Cesta	RE Fase 1	RE Fase 2	RE Fase 3
11/03/2020	13	Cesta 3	8059	7692	7326
15/12/2020	158	Cesta 4	9301	7834	7755

Tabla 17: Índice de desgaste refractario (RWI)

Fecha	#Colada	# Cesta	RWI Fase 1	RWI Fase 2	RWI Fase 3
11/03/2020	13	Cesta 3	2780	2701	1853
15/12/2020	158	Cesta 4	3335	2769	2729

A finales de la campaña del horno correspondiente a los experimentos realizados con 158 coladas se midió el desgaste que tenían los ladrillos refractarios para cada fase del HAE. En la figura 18 se muestran las fotos tomadas.

a)



b)



c)



d)



Figura 18: Fotos tomadas a los ladrillos refractarios de la pared del HAE:

- a) Zona 1 (Fase 2): 50 mm
- b) Zona 2 (Fase 1): 70 mm
- c) Zona 3 (Fase 1): 80 mm
- d) Zona 4 (Fase 3): 90 mm

En la figura 19 se hizo la correlación de las medidas de los ladrillos refractarios y las temperaturas IR. A partir de estos datos se obtuvo una expresión para cada zona estudiada en el horno, donde, a partir de la temperatura IR se permite estimar el desgaste del refractario.

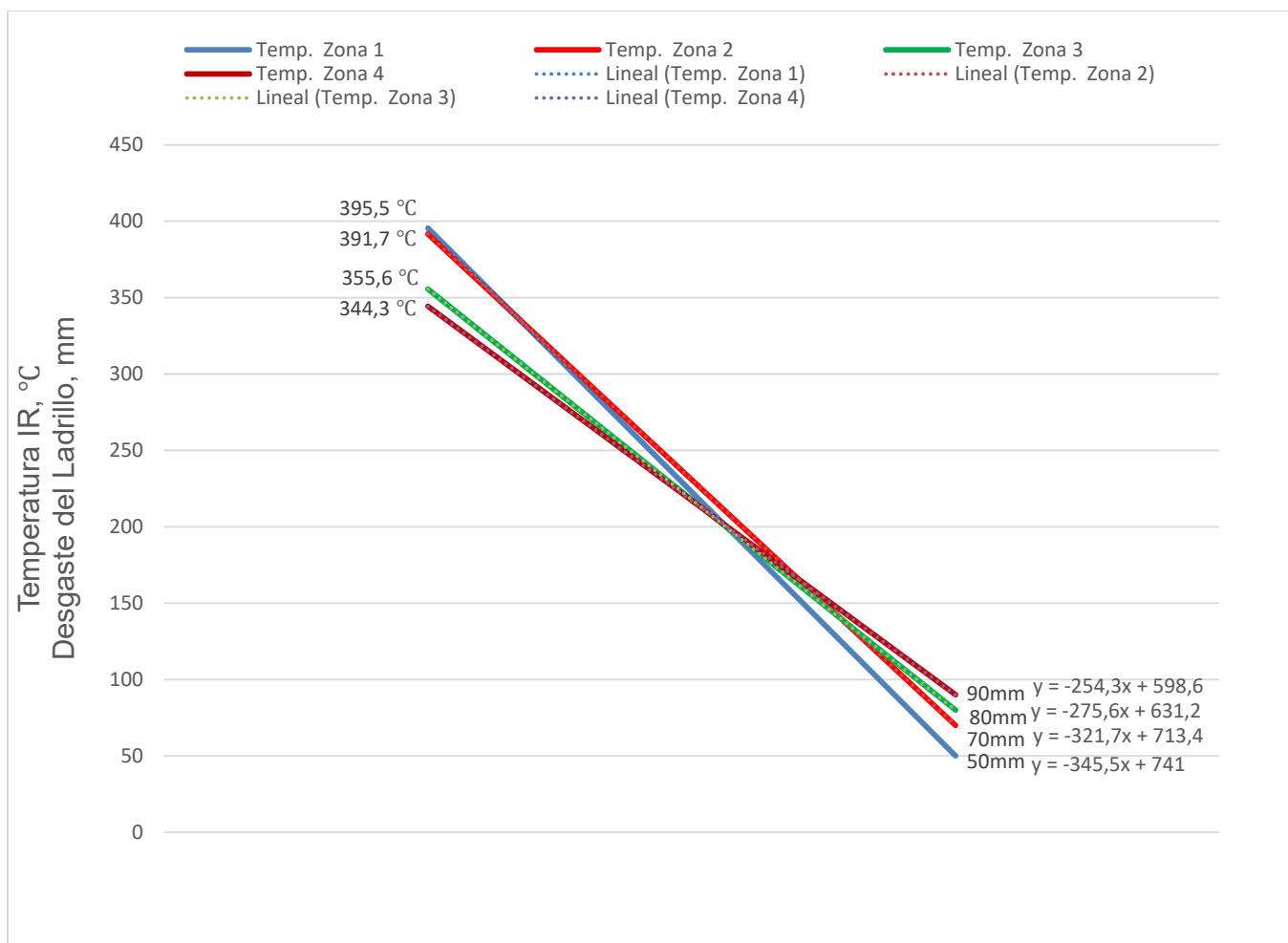


Figura 19: Correlación del desgaste del ladrillo refractario y las temperaturas IR

2.5.2. RESULTADOS PARA LA OBTENCIÓN DEL ÍNDICE DE CESTA FUNDIDA.

Luego de realizar las simulaciones para los tres experimentos seleccionados se obtuvieron los resultados que se muestran en las figuras a continuación.

En las figuras 20 y 21 se muestran los resultados para dos de los experimentos realizados para el FIS ICF Primeras Cestas. En la figura 22 se muestra los resultados de uno de los experimentos realizados para el FIS ICF Última Cesta. Para la colada 12749_ Cesta 1 se alcanzó el ICF en el 106 %, para la colada 12756_ Cesta 1 se alcanzó el ICF en el 108 % y para la colada 12757_ Cesta4 se alcanzó el ICF en el 113 %. Para los tres casos de estudio las gráficas reflejan que el 100 % del ICF para determinar que la cesta esta fundida se alcanza en torno al punto 3100 s. Producto a la incertidumbre que el operador tiene para tomar la decisión de que la cesta ya está fundida,

este demarará en parar el HAE y provoca pérdidas de un tiempo de 3.3 min , de energía de 1.49 MW y económica de 5041 cup.

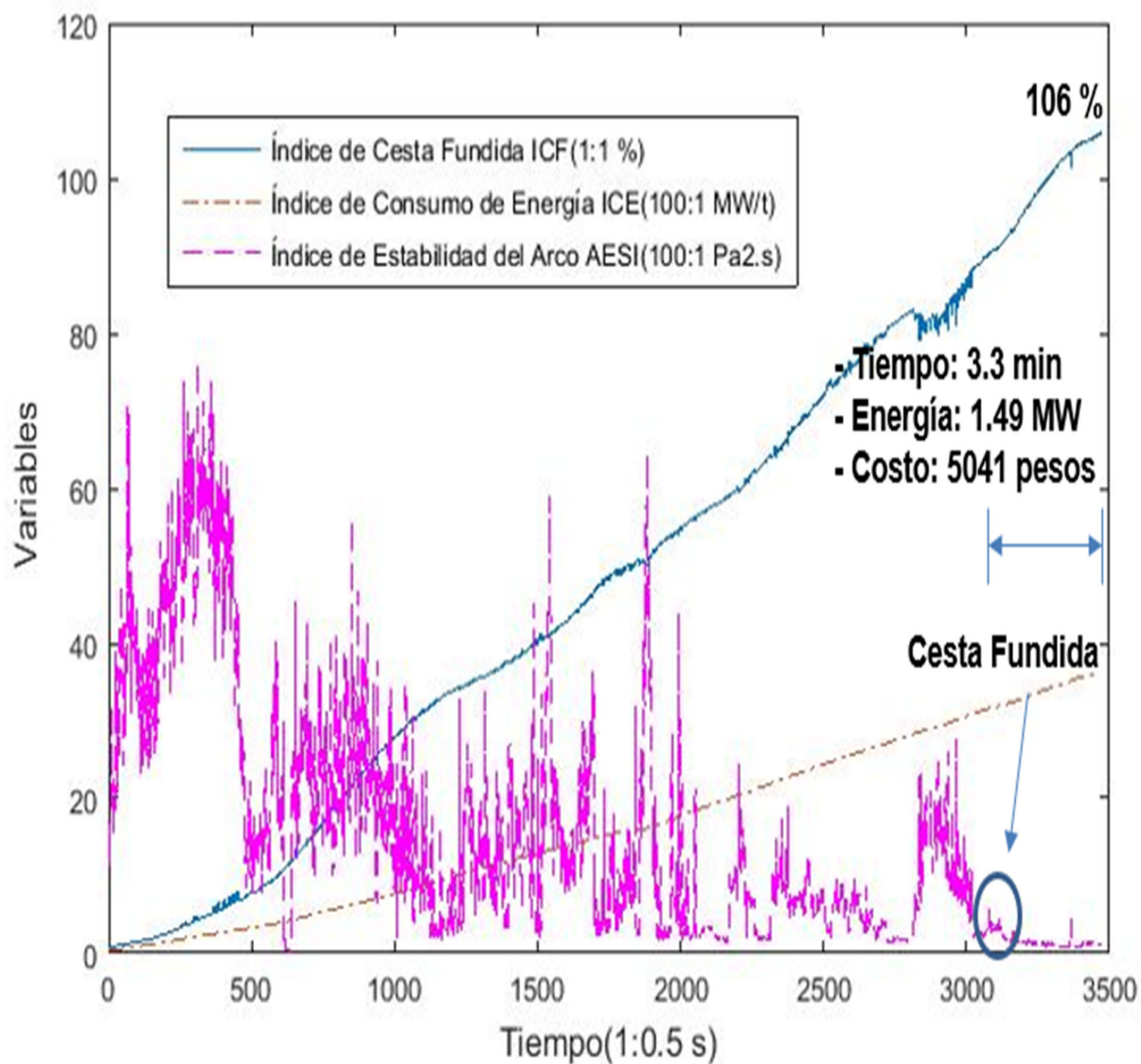


Figura 20: Resultados del experimento de la Colada 12749 – Cesta 1 para el FIS ICF Primeras Cestas

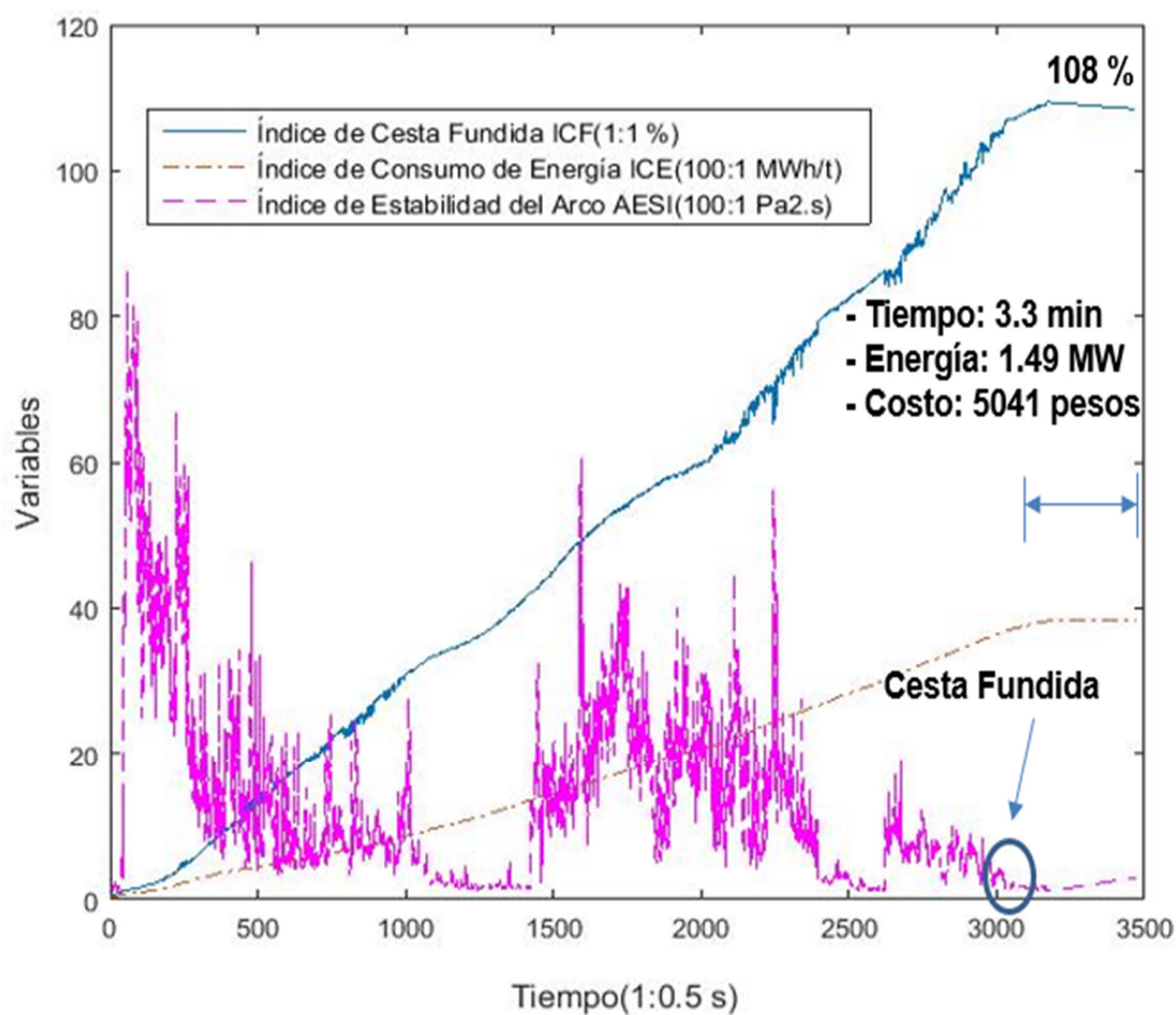


Figura 21: Resultados del experimento de la Colada 12756- Cesta 1 para el FIS ICF Primeras Cestas:

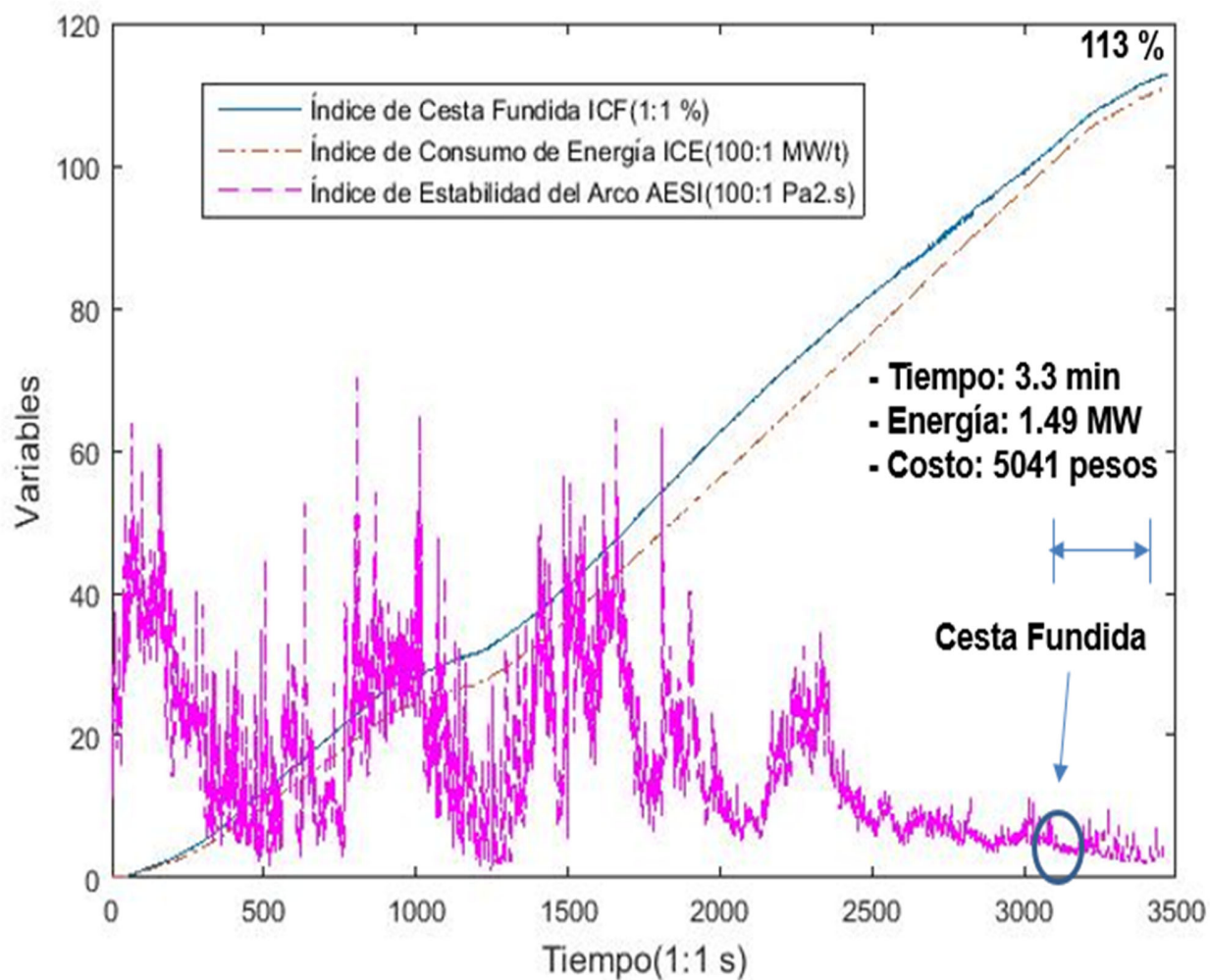


Figura 23: Resultados del experimento de la Colada 12757 – Cesta 4 para el FIS ICF Últimas Cestas:

Teniendo en cuenta el índice de consumo y el costo por tonelada de acero de electrodo y refractario; componentes fundamentales del HAE, se realizaron los siguientes cálculos.

Índice de consumo refractario en el HAE: 7,172Kg/t

Precio o costo de refractario por tonelada de acero: 69,51cup

Estimado del gasto de refractario por colada = $7,172\text{Kg/t} \cdot 60\text{t} = 430\text{Kg}$

Estimado del ahorro del costo de refractario por colada = $430\text{Kg} \cdot 69,51\text{cup} = 29889\text{cup}$

Índice de consumo de electrodo en el HAE: 2,45Kg/t

Precio o costo de refractario por tonelada de acero: 447,7cup

Estimado del gasto de refractario por colada = $2,45\text{Kg/t} \cdot 60\text{t} = 147\text{Kg}$

Estimación del ahorro del costo de electrodos por tonelada de acero en una colada = $147\text{Kg} \cdot 447,7\text{cup} = 65812\text{cup}$

Teniendo en cuenta el índice de consumo de energía eléctrica en un minuto de fundición y el costo para 1 MWh en el HAE, se realizaron los siguientes cálculos.

Consumo de energía promedio en 1 minuto de fundición: 0,45MW/min

Costo 1MW/min: 3383,4cup

Tiempo = $3500 - 3100 = 400/2 = 200/60 = 3,3\text{min}$

Energía = $3,3\text{min} \cdot 0,45\text{MW/min} = 1,49\text{MW}$

Costo = $1,49\text{MW} \cdot 3383,4\text{cup} = 5041\text{cup}$

EFFECTO DE LA IMPLEMENTACIÓN DE LA PROPUESTA:

1. Se estima un ahorro del costo de electrodos por tonelada de acero en una colada de 65812 CUP.
2. Se estima un ahorro del costo de refractario por tonelada de acero en una colada de 29889 CUP.
3. Para cada cesta en una colada se ahorrarían 3.3 min lo que equivale a 5041 CUP.

CONCLUSIONES:

- ❖ La obtención de un Índice de Cesta Fundida permite al operario determinar el momento ideal de cesta fundida con el consiguiente ahorro energético.
- ❖ La obtención de un Índice de Desgaste del Refractario permite al operario determinar el momento ideal de mantenimiento del refractario pudiéndose extender o acotar los tiempos de mantenimiento para evitar paradas imprevistas por daños catastróficos y pérdidas económicas por los elevados costos de estos componentes y operaciones.
- ❖ El Procesamiento de imágenes térmicas infrarrojas permitió evaluar el espesor y desgaste erosivo del refractario en un horno de arco eléctrico trifásico de CA.
- ❖ Con los resultados obtenidos a partir de las simulaciones experimentales se contribuye al ahorro energético y estimar el comportamiento del sistema.

RECOMENDACIONES:

- ❖ Realizar mayor cantidad de experimentos, toma de datos y simulaciones para la validación del Índice Cesta Fundida.
- ❖ El uso de Redes Neuronales que permitan el procesamiento y entrenamiento de grandes cantidades de datos para la obtención del Índice de Cesta Fundida.
- ❖ La implementación de un sistema de cámaras para análisis de imágenes infrarrojas para caracterizar el comportamiento del refractario en HAE.

BIBLIOGRAFÍA:

- [1] J. Madías, "Sistemas de control."
- [2] J. Lueckhoff, J. Apfel, and J. Buttler, "The vision of a fully automated mini mill," ed: AISTech, 2016.
- [3] H. G. Fohringer, Th.; Dittmer, B.; and R. K. Krump, S.; Sedivy, C, "What is the contribution of an electrode control system to industrie 4.0."
- [4] C. F. P. Mendes, J. L. Bernal-Agustín, Á. Elgueta-Ruiz, and R. Dufo-López, "Smart Grids for the City of Praia: Benefits and Challenges," *International Journal of Environmental Science & Sustainable Development*, vol. 3, no. 2, pp. 36-52, 2018.
- [5] J. Madías, S. Hornby, and F. Torre, "UNA REVISIÓN CRÍTICA DE DESARROLLOS TECNOLÓGICOS RECIENTES EN HORNOS ELÉCTRICOS DE ARCO," 2016.
- [6] J. Motte, M. Beurotte, G. Provost, Z. Foroglou, and V. Antonopoulos, "Optimisation des performances des revêtements de convertisseur à l'aciérie n° 2 de Dunkerque," *Revue de Métallurgie*, vol. 85, no. 5, pp. 381-390, 1988.
- [7] R. Steiner, G. Lammer, C. Spiel, and C. Jandl, "Refractories 4.0," *BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte*, vol. 162, no. 11, pp. 514-520, 2017.
- [8] R. Ahola and R. Myllyla, "Analysing the dynamics of fast-moving objects using a pulsed laser diode," in *Industrial Applications of Laser Technology*, 1983, vol. 398, pp. 322-328: International Society for Optics and Photonics.
- [9] J. Kostamovaara, "Techniques and devices for positron lifetime measurement and time-of-flight laser rangefinding," 1990.
- [10] R. Ahola, *A pulsed time-of-flight laser rangefinder for fast, short-range, high resolution applications*. University of Oulu, 1987.
- [11] I. Moring, T. Heikkinen, R. Myllyla, and A. Kilpela, "Acquisition of three-dimensional image data by a scanning laser range finder," *Optical engineering*, vol. 28, no. 8, p. 288897, 1989.
- [12] H. Ailisto, J. Kostamovaara, I. Moring, and R. Myllylä, "Applications of laser radar," *Sensor Review*, 1993.
- [13] K. Määttä, J. Kostamovaara, and R. Myllylä, "Profiling of hot surfaces by pulsed time-of-flight laser range finder techniques," *Applied optics*, vol. 32, no. 27, pp. 5334-5347, 1993.
- [14] H. J. Ailisto, R. S. Mitikka, I. Moring, and H. Jokinen, "Vison guidance of a laser profiler for monitoring refractory lining wear in steel mills," in *Videometrics IV*, 1995, vol. 2598, pp. 245-254: International Society for Optics and Photonics.
- [15] F. L. C. Campos Junior, S. L. B. Lana, and P. S. Assis, "Pelletizing furnace refractory lining life cycle extension by applying thermography analysis and direct refractory injection," *REM-International Engineering Journal*, vol. 71, no. 3, pp. 419-424, 2018.
- [16] K. MAYERKAR, WAGH y SHINDE, 2016.
- [17] J. Madías, "Procesamiento de chatarra para acerías," *Acero Latinoamericano*, pp. 48-56, 2011.

- [18] S. Hornby, J. Madias, F. Torre, A. ArcelorMittal, and S. Rosario, "Myths and Realities of Charging DRI/HBI in Electric Arc Furnaces," *Iron & Steel Technology*, 2016.
- [19] M. G. Marcozzi, M., "The evolution of preheating and the importance of the hot heel in supersized EAF systemsll," pp. 82-91, 2011.
- [20] A. A. Müller, J.; Beile, H, "First results from TYASAll," *METEC 2nd ESTAD*, June 2015.
- [21] Y. Sato, "Realization of the coexistence of energy saving and environmental measure in the EAF-Concept of ECOARC TM," 2011.
- [22] "Memorial II."
- [23] R. A. H. León and S. C. González, "Métodos cualitativos de investigación.¿ Ciencia?," *INFOCIENCIA*, vol. 4, no. 1, 2010.
- [24] K. P. L. Hurley J.P., "Improved corrosion resistance of alumina refractories (Final topical report)," 2001.
- [25] M. Blachnik, K. Mączka, and T. Wieczorek, "A model for temperature prediction of melted steel in the electric arc furnace (EAF)," in *International Conference on Artificial Intelligence and Soft Computing*, 2010, pp. 371-378: Springer.
- [26] J.-C. Baumert, R. Engel, and C. Weiler, "Dynamic modelling of the electric arc furnace process using artificial neural networks," *Revue de Métallurgie*, vol. 99, no. 10, pp. 839-849, 2002.
- [27] B. Boulet, G. Lalli, and M. Ajersch, "Modeling and control of an electric arc furnace," in *Proceedings of the 2003 American Control Conference, 2003.*, 2003, vol. 4, pp. 3060-3064: IEEE.
- [28] ""Energy Technology Perspectives 2012 – Pathways to a clean energy system", " *Published by International Energy Agency*, 2012.
- [29] S. Hornby and S. Hornby, "Mini-Mill Burdening for Maximum Efficiency and Yield?," *Iron & Steel Technology*, vol. 12, no. 1, pp. 50-62, 2015.
- [30] ""Nuevo sistema de carga de cestas automatiza la alimentación de chatarra en acerías de horno eléctrico", " *Gacetilla de Prensa, Siemens Metals Technologies, Linz, Austria*, enero 2013.
- [31] J. Madías, "Recuperación de energía en hornos eléctricos de arco," *Acero Latinoamericano*, pp. 34-41, 2010.
- [32] D. Patrizio and M. Orsini, "One bucket charging Fastarc™ in Jacksonville," *La Metallurgia Italiana*, 2010.
- [33] S. Laurenti, R. Gottardi, S. Miani, and A. Partyka, "High performance single-bucket charging EAF practice," *Ironmaking & steelmaking*, vol. 32, no. 3, pp. 195-198, 2005.
- [34] B. K. Butcher, Y.; Laroy, B.; Vanover, K.; Meyer, S., ""Single charge EAF modification: Installation and experience., " *AISTech 2010 Proceedings*, vol. Volume I, pp. 771-781., 2010.
- [35] D. V. Ellis, V.; Abel, M.; Daum, Th., ""EVRAZ Pueblo best practice operation with SIMETAL EAF Ultimate technology — 7 years of records in the making", " *AISTech Conference Proceedings*, pp. 707-716.
- [36] P. Ż. I. P. T. ZŁOMU, W. E. P. ŁUKOWYCH–NOWA, I. BARDZO, and D. M. D. Z. A. STEROWANIEM, "FOAMING SLAG AND SCRAP MELTING BEHAVIOR IN ELECTRIC ARC FURNACE—A NEW AND VERY PRECISE DETECTION

- METHOD WITH AUTOMATIC CARBON CONTROL," *Archives of Metallurgy and Materials*, vol. 53, no. 2, 2008.
- [37] M. A. Dorndorf, M.; Aflenzer, H.; Vaillancourt, D.; Tratnig, M., "The holistic approach for efficient scrap melting", *4o Seminário de Aciaria da ABM, Araxá, Brasil*, mayo 2013.
- [38] R. P. Gottardi, A.; Miani, S.; Novak, H.A.; Klipa, N., "Enhanced Slag Door for Electric Arc Furnace", *AISTech 2011 Proceedings – Volume I*, pp. 857-865, 2011.
- [39] M. B. H. Gripenberg, and M. Petersson, "Optimal Distribution of Oxygen in High Efficiency Arc Furnaces", *Iron and Steel Engineer* 1990.
- [40] J. A. Jones, B. Bowman, and P. A. Lefrank, "Electric furnace steelmaking," *The making, shaping and treating of steel*, vol. 1, 1998.
- [41] H. J. Odenthal, A. Kemminger, F. Krause, L. Sankowski, N. Uebber, and N. Vogl, "Review on modeling and simulation of the electric arc furnace (EAF)," *steel research international*, vol. 89, no. 1, p. 1700098, 2018.
- [42] W. E. Schwabe, "Electric Furnace Conf," pp. 20, 195, 1962.
- [43] J. J. Tragesar, "Power Usage and Electrical Circuit Analysis for Electric Circuit Analysis for Electric Arc Furnaces," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. Vol. 1A-16, No. 2, pp. 277-284, 1980.
- [44] M. M. Munroe, "Refractory Erosion Index in Electric Arc Furnaces," 1986.
- [45] J. Trageser, "Power usage and electrical circuit analysis for electric arc furnaces," *IEEE transactions on industry applications*, no. 2, pp. 277-284, 1980.
- [46] B. B. a. D. W. G.R. Jordan, "Electrical and Photographic Measurements of High Power Arcs," *Journal of Physics, D: Applied Physics*, vol. Vol. 3, pp. 1039-1089, 1970.
- [47] M. M. Munroe, "A Computer Simulation Model of Electric Furnace Arcs," *First IASTED International Conference on Applied Modelling and Simulation*, vol. Vol. 111, pp. 199-202, September 1981.
- [48] M. M. Munroe, "Radiation Characteristics of Electric Furnace Arcs," *Proceedings, 17th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference*, vol. Vol. 1, August 1982.
- [49] J. Poirier, "A review: influence of refractories on steel quality," *Metallurgical Research & Technology*, vol. 112, no. 4, p. 410, 2015.
- [50] K. K. B. Dittmer, "Elektrowärme Int," p. 195, 2009.
- [51] K. K. B. Bowman, "Electric Arc Furnace Physics," 2009.
- [52] Š. J. Fremunt P., "Tavení oceli v elektických pecích," 1984.
- [53] C. C. Pretorius B.E., "Foamy slag fundamentals and their practical application to electric furnace steelmaking," 1988.
- [54] B. J. P. Kwong K.S., "Recycling practices of spent MgO-C refractories," *Journal of minerals characterization & engineering*, vol. Vol.1, pp. 69-78, 2002.
- [55] R. M., "Současné trendy vývoje technologie výroby oceli, Tanger," 2006.
- [56] R. P., "Žiaruvzdorné materiály pre elektrické oblúkové pece – štandardné a inovované riešenia, Acta metallurgica slovac," 2000.
- [57] F. D., "Latest EAF statistics from IISI," *AISE steel technology*, pp. 65-67, 1999.
- [58] Harbison-Walker, "Modern Refractory Practice " 1992.
- [59] B. J.P., "SiAlON bonded alumina refractories for iron and steel industry," *Conference and exhibiton of the european ceramic society*, 1977.

- [60] Novák, "Zkušenosti se zaváděním technologie pěnivé strusky při výrobě čistých a superčistých ocelí v podmínkách ocelárny Pilsen Steel," 2008.
- [61] S. Mills K.C., Y., Fox A.B., Li Z., Thackray R.P., Tsai H.T., "A review of slag splashing," vol. Vol. 45, pp. 619-633, 2005.
- [62] A. V. T. A. K. NA, Ž. V. NISTEJE, and E. O. PECE, "Analysis of the slag and metal influence on the life of Electric Arc Furnace Hearth Refractory Lining," *Acta Metallurgica Slovaca*, vol. 15, no. 2, pp. 77-85, 2009.
- [63] M. TKADLEČKOVÁ, K. GRYC, L. SOCHA, K. MICHALEK, P. KLUS, and P. MACHOVČÁK, "Comparison of numerical results with thermography measurement," in *METAL 2012, Conference proceedings, 21th Anniversary International Conference on Metallurgy and Materials, Symposium A: Advanced ironmaking and steelmaking*, 2012, pp. 59-65.
- [64] R. Fabian, Z. Peřina, F. Čmiel, and E. Rykalova, "The Evaluation of Different Variants of the Implemented Measures to Eliminate the Influence of the Selected Thermal Bridge by Means of Diagnostic Measurements," *International Journal of Civil and Environmental Engineering*, vol. 35, no. 2, pp. 1181-1191, 2013.
- [65] Z. Peřina, J. Solař, F. Čmiel, and R. Fabian, "The Elimination of Reflected Radiation in an Infrared Thermographic Measurement in the Exterior," in *Advanced Materials Research*, 2014, vol. 923, pp. 187-190: Trans Tech Publ.
- [66] Z. Peřina, B. Plšek, and M. Wolfová, "Verification of range of chemical grouting of masonry by non-destructive method using infrared thermography," in *Advanced Materials Research*, 2014, vol. 923, pp. 191-194: Trans Tech Publ.
- [67] E. Rykalová, Z. Peřina, R. Fabian, and P. Jonšta, "Possibilities of Use of the Thermographic Measurement as a tool for detecting defects and improving the production process," in *Advanced Materials Research*, 2015, vol. 1127, pp. 23-29: Trans Tech Publ.
- [68] S. Chiartano, P. Prigent, and S. Pinard, "STUDY OF WEAR MECHANISMS OF DELTA ROOF REFRACTORIES IN EAF," 2015.
- [69] C. Colace, L. Fumagalli, S. Pala, M. Macchi, N. R. Matarazzo, and M. Rondi, "Implementation of a condition monitoring system on an electric arc furnace through a risk-based methodology," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability*, vol. 229, no. 4, pp. 327-342, 2015.
- [70] S. Aghassi *et al.*, "Integrative Produktionstechnik für Hochlohnländer," in *Integrative Produktionstechnik für Hochlohnländer*: Springer, 2011, pp. 17-81.
- [71] J. P. J. Womack, D. T.; Roos, D., "The Machine That Changed the World: The Story of Lean Production," pp. 256–275, 1990.
- [72] G. Lammer, C. Jandl, and K.-m. Zettl, "Method for determining the state of a refractory lining of a metallurgical vessel for molten metal in particular," ed: Google Patents, 2016.
- [73] H.-J. Odenthal, A. Kemminger, F. Krause, and N. Vogl, "A holistic CFD approach for standard and shaft-type electric arc furnaces," *Proceedings of the AISTech*, 2017.
- [74] B. Chakraborty and B. K. Sinha, "Process-integrated steel ladle monitoring, based on infrared imaging—a robust approach to avoid ladle breakout," *Quantitative InfraRed Thermography Journal*, vol. 17, no. 3, pp. 169-191, 2020.

-
- [75] L. C. Bonilla *et al.*, "Prediction of Refractory Lining Thickness in an Electric Furnace Using Thermography as a Non-destructive Testing Technique," in *European Workshop on Structural Health Monitoring*, 2020, pp. 289-298: Springer.
 - [76] "www.stahl-online," 25.01.2017.
 - [77] J. Rutovitz, E. Dominish, and J. Downes, "Calculating global energy sector jobs: 2015 methodology," 2015.
 - [78] L. A. Zadeh, "Information and control," *Fuzzy sets*, vol. 8, no. 3, pp. 338-353, 1965.
 - [79] A. J. B. Piña, *Síntesis de Sistemas de Control Borroso Estables por Diseño: Tesis Doctoral*. A. Javier Barragán Piña, 2010.
 - [80] G. González-Yero, M. Ramírez-Mendoza, and V. Góngora-Carreras, "Identificación del sistema de control del nivel en molde para el vaciado continuo de acero en la empresa de aceros inoxidables acinox-las tunas," *Ciencia en su PC*, no. 3, pp. 109-120, 2010.
 - [81] R. H. Haber and A. Cipriano, *Control borroso*. CYTED, 1994.
 - [82] E. Inagaki, I. Kikuma, and M. Ichikawa, "Integrated oxygen enrichment control to attain maximum overall economy in steelmaking arc furnaces," in *Malaga, Spain: 11th International Electric Melting Conference*, 1988.
 - [83] D. Schroeder, "Use of Energies in Electric Steelmaking Shops," *Electric Furnace Conference Proceedings*, vol. 49, 1991.
 - [84] K.-H. Klein and G. Paul, "Reflections on the Possibilities and Limitations of Cost Saving in Steel Production in Electric Arc Furnaces," *Metall. Plant Technol. Int.*, vol. 12, no. 1, p. 32, 1989.
 - [85] "Oxygen in Electric Arc Furnaces, Liquid Air Corp."
 - [86] A. Adolph, G. Paul, K. Klein, E. Lepoutre, J. Vuillermoz, and M. Devaux, "A new concept for using oxy-fuel burners and oxygen lances to optimize electric arc furnace operation," *Revue de Métallurgie*, vol. 87, no. 1, pp. 47-54, 1990.
 - [87] J. Goodwill, "Demand Side Management for Electric Arc Furnaces," in *Electric Furnace Conference Proceedings.*, 1991, vol. 49, pp. 81-85.
 - [88] W. Ballandino, J. Ehie, and H. Knapp, "The Oval Shaped Bottom Tapping Furnace at Acciaierie Venete," *Metall. Plant Technol. Int.*, vol. 12, no. 5, pp. 62-68, 1989.
 - [89] K. Bergman and R. Gottardi, "Design Criterion for the Modern UHP Electric Arc Furnaces With Auxiliaries," in *3rd European Electric Steel Congress*, 1989, pp. 169-178.
 - [90] Y. N. Toulouevski and I. Y. Zinurov, "Modern Steelmaking in Electric Arc Furnaces: History and Development," in *Innovation in Electric Arc Furnaces*: Springer, 2013, pp. 1-24.
 - [91] M. Tunc, U. Camdali, and G. Arasil, "Energy analysis of the operation of an electric-arc furnace at a steel company in Turkey," *Metallurgist*, vol. 59, no. 5-6, pp. 489-497, 2015.
 - [92] L. Damiani, R. Revetria, P. Giribone, and M. Schenone, "Energy Requirements Estimation Models for Iron and Steel Industry Applied to Electric Steelworks," in *The World Congress on Engineering and Computer Science*, 2017, pp. 13-29: Springer.

- [93] S. Shyamal and C. L. Swartz, "Real-time energy management for electric arc furnace operation," *Journal of Process Control*, vol. 74, pp. 50-62, 2019.
- [94] D. Gajic, I. Savic-Gajic, I. Savic, 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.
- [95] S. Zhao, I. E. Grossmann, and L. Tang, "Integrated scheduling of rolling sector in steel production with consideration of energy consumption under time-of-use electricity prices," *Computers & Chemical Engineering*, vol. 111, pp. 55-65, 2018.
- [96] J. Guerra-Serrano *et al.*, "New Arc Stability Index for Industrial AC Three-Phase Electric Arc Furnaces Based on Acoustic Signals," *Sensors*, vol. 20, no. 23, p. 6840, 2020.

ANEXOS

ANEXO 1:

Foto de 2 ladrillos refractarios nuevos. Derecha: 350 mm e Izquierda: 250mm.

