

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

Autor: Ing. Luis Ángel Moreno Del Toro

Tutores: Dr. C. Guillermo González Yero

Dr. C. Rafael Trujillo Codorniu

Consultantes: Ing. José Ramírez Torres

Ing. Wilber Gómez Ávila

**Santiago de Cuba**

2022



UNIVERSIDAD  
DE ORIENTE

Facultad de Ingeniería Eléctrica

Departamento de Ingeniería en Automática

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

Título: Sistema borroso para ajustar el valor deseado en el control del insuflado de gas en un Horno Cuchara

Autor: Ing. Luis Ángel Moreno Del Toro

Tutores: Dr. C. Guillermo González Yero

Dr. C. Rafael Trujillo Codorniu

Consultantes: Ing. José Ramírez Torres

Ing. Wilber Gómez Ávila

## ***Pensamiento***

*¿Para qué, sino para poner paz entre los hombres han de ser los adelantos de la ciencia?*

*José Martí*

## ***Dedicatoria***

*A mi esposa por estar siempre a mi lado en cada momento de mi vida.*

*A mi hijo porque quiero dejarle el mejor ejemplo para cuando él esté realizando su carrera profesional.*

*A mis padres por la esmerada enseñanza que me brindaron desde la niñez y el impulso al estudio.*

*A mi familia, en especial a mis hermanas por brindarme su apoyo incondicional para llegar hasta aquí.*

## **Agradecimientos**

*A mi familia por el apoyo que me han brindado, por todos los consejos y ayuda que me brindaron para cumplir esta meta.*

*A mi tutor de Tesis Dr. C.T. Guillermo González Yero por ser mi guía y por brindar su apoyo incondicional en la elaboración de este proyecto.*

*A mis compañeros de la empresa Copextel S.A. Las Tunas por su apoyo.*

*A la Universidad de Oriente y en especial a la Facultad de Ingeniería Eléctrica, la cual me ha dado la oportunidad de superarme profesionalmente.*

*A mis compañeros de maestría por los momentos compartidos durante cada encuentro y demás actividades.*

*Al personal de la Empresa ACINOX Las Tunas, por brindarme su ayuda en el desarrollo de este proyecto y por la asignación de un buen plantel de profesores.*

## **Resumen**

Los procesos de afino o de metalurgia secundaria que se realizan en un Horno Cuchara, permiten ajustar la composición y la temperatura del acero. Para este fin, se emplea agitación a través de un gas inerte, permitiendo mejorar la mezcla y las reacciones en el metal líquido. En este proceso juega un papel determinante el sistema de control del insuflado de gas, el cual no siempre es capaz de responder adecuadamente ante las perturbaciones e incertidumbres que afectan al proceso de homogenización. Además, es difícil realizar mediciones directas de todas las variables relacionadas con la ocurrencia de fenómenos de gran complejidad que afectan la calidad de la homogenización. En esta investigación se estudió el proceso y se realizaron experimentos en el Horno Cuchara de ACINOX Las Tunas para proponer un sistema basado en lógica borrosa que permite medir el efecto de las perturbaciones en el proceso y realizar una corrección en línea del valor deseado para el lazo de control de insuflado. El estudio realizado, a escala de simulación empleando el software Matlab®, permitió evaluar como satisfactorias las acciones correctoras de la propuesta ante las principales perturbaciones. Lo anterior, también fue corroborado mediante encuestas a los expertos y con análisis de alternativas. Los resultados alcanzados permiten estimar que este sistema borroso puede mejorar los resultados de la homogenización del acero en el caso de estudio, disminuir índices de consumo, reducir tiempo de ciclo de producción, aumentar la calidad del producto terminado y humanizar el trabajo.

## **Abstract**

The refining or secondary metallurgy processes carried out in a Ladle Furnace allow the composition and temperature of the steel to be adjusted. For this purpose, agitation through an inert gas is used, allowing to improve the mixture and the reactions in the liquid metal. In this process, the gas insufflation control system plays a determining role, which is not always capable of responding adequately to the disturbances and uncertainties that affect the homogenization process. In addition, it is difficult to make direct measurements of all the variables related to the occurrence of highly complex phenomena that affect the quality of homogenization. In this research, the process was studied and experiments were carried out in the Ladle Furnace of ACINOX Las Tunas for proposing a system based on fuzzy logic that allows measuring the effect of disturbances in the process and performing an online set point correction of the control loop. The study carried out at a simulation scale using the Matlab® software, allowed to qualify the proposal as satisfactory, by analyzing its corrective actions when the main disturbances occur. The foregoing was also corroborated through surveys of experts and analysis of alternatives. The results achieved allow estimating that this fuzzy system can improve the results of the steel homogenization in the case of study, reduce consumption rates, reduce production cycle time, increase the product quality and humanize the work.

# Índice

Introducción .....	6
Capítulo 1 Fundamentos teóricos para el diseño de un sistema borroso para ajustar el valor deseado en el lazo de control del insuflado de gas en el Horno Cuchara. ....	13
Introducción .....	13
1.1 Sistemas de homogenización del acero a través del insuflado de gas en los Hornos Cuchara.....	13
1.1.1 Sistema de insuflado de gas en los Hornos Cuchara.....	16
1.2 Sistemas de control del insuflado de gas en los Hornos Cuchara.....	19
1.2.1 Insuficiencias en el sistema de control del insuflado de gas en el Horno Cuchara. ....	28
1.3 Estrategias de los sistemas de control del insuflado de gas en el Horno Cuchara. ....	33
Conclusiones .....	37
Capítulo 2 Diseño de un sistema borroso para ajustar el valor deseado en el lazo de control del insuflado de gas en un Horno Cuchara.....	39
Introducción .....	39
2.1 Fundamentos teóricos de la propuesta.....	39
2.2 Diseño de Experimentos. ....	40
2.2.1 Determinación del estado de la Agitación del acero líquido en el Horno Cuchara con el insuflado de gas a partir de la medición de diferentes variables.	40
2.2.2 Recolección de los datos experimentales.....	47
2.3 Esquema Propuesto con lógica borrosa para ajustar el valor deseado del control del insuflado de gas en el Horno Cuchara .....	54
2.3.1 Modelado del sistema difuso Altura de la Escoria.....	55
2.3.2 Modelado del sistema difuso Estado de la Agitación.....	62

---

2.3.3	Modelado del sistema difuso Ajuste Flujo Deseado.....	64
2.4	Resultados a Escala de Simulación del sistema propuesto para ajustar el valor deseado en el control del insuflado de gas.....	66
2.5	Análisis y discusión de los Resultados .....	71
2.6	Valoración o corroboración de los resultados alcanzados .....	74
	Conclusiones .....	79
	Conclusiones generales .....	81
	Recomendaciones .....	82
	Bibliografía .....	83
	Anexos .....	86
	Anexo 1 .....	86
	Anexo 2.....	89
	Anexo 3.....	93
	Anexo 4.....	106

## ***Lista de símbolos***

---

<b>Símbolo</b>	<b>Descripción</b>
<b>HAE</b>	<b>Horno de Arco Eléctrico</b>
<b>HC</b>	<b>Horno Cuchara</b>
<b>IVC</b>	<b>Proceso de Vaciado Continuo</b>
<b>IFE</b>	<b>Índice de Flujo Efectivo</b>
<b>CoefDR</b>	<b>Coefficiente de Resistencia</b>
<b>ANFIS</b>	<b>Sistema de Inferencia Neuro Difuso Adaptativo</b>
<b>TDH</b>	<b>Distorsión Total de Armónica</b>
<b>ka</b>	<b>Asimetría de las corrientes de fase</b>
<b>FIS</b>	<b>Sistema de Inferencia Borrosa</b>
<b>SND</b>	<b>Sistema Neuro Difuso</b>

## **Lista de Figuras**

Figura 1.1 la cuchara en el proceso de Fabricación del acero.....	14
Figura 1.2 Esquema horno de Cuchara .....	15
Figura 1.3. Horno Cuchara de ACINOX las Tunas.....	16
Figura 1.4 Insuflado de gas en Horno Cuchara .....	17
Figura 1.5 Sistema porta tapón poroso.....	19
Figura 1.6. Diagrama esquemático para registrar datos sobre la vibración.....	23
Figura 1.7. Programa de procesamiento de imágenes.....	25
Figura 1.8. Limitación del campo visual por adhesiones de acero/escoria, humo entre la cámara y la superficie del baño y agitado sin apertura del ojo.....	26
Figura 1.9. Sistema para visualizar el burbujeo de argón en la cuchara .....	27
Figura 1.10. Visualización de la rampa distribuidora del gas (argón y nitrógeno) .....	29
Figura 1.11. Rampa distribuidora del gas (argón o nitrógeno).....	29
Figura 1.12. Aplicación SCADA del proceso en el Horno Cuchara con el insuflado de gas. ....	30
Figura 1.13. Foto del ojo metálico en Horno Cuchara ACINOX Tunas.....	31
FIGURA 1.14. DIAGRAMA EN BLOQUES DEL SISTEMA DE CONTROL DEL INSUFLADO DE GAS EN HORNO CUCHARA .....	32
FIGURA 1.15. PLC SIMATIC S5 135U DE LA SIEMENS PARA EL CONTROL DE FLUJO DE GAS EN EL HORNO CUCHARA.....	33
FIGURA 1.16. ESTRUCTURA DE UN CONTROLADOR BORROSO.....	36
FIGURA 1.17. ESQUEMA DE CONTROL CON MEDICIÓN DIRECTA DEL EFECTO DE LAS PERTURBACIONES, REALIZANDO UNA CORRECCIÓN EN LÍNEA DEL VALOR DE REFERENCIA DEL LAZO DE CONTROL DE FLUJO .....	37
FIGURA 2.1. PANEL DE SUPERVISIÓN Y CONTROL DEL PROCESO DE INSUFLADO DE GAS .....	42
FIGURA 2.2. TUBO PREPARADO PARA MEDIR EL ESPESOR DE ESCORIA .....	43
FIGURA 2.3. FOTO DEL OJO METÁLICO EN HORNO CUCHARA DE ACINOX TUNAS .....	43

*Lista de símbolos, términos especiales y abreviaturas no normalizadas*

---

FIGURA 2.4. ESTACIÓN EXPERIMENTAL EN HORNO CUCHARA ACINOX TUNAS.....	45
FIGURA 2.5. ANALIZADOR DE REDES, CONECTADO EN EL HORNO CUCHARA DE ACINOX TUNAS .....	46
FIGURA 2.6. MEDICIÓN DE LA ESCORIA EN EL HORNO CUCHARA DE ACINOX TUNAS.....	47
FIGURA 2.7 COMPORTAMIENTO DE LA VARIABLE THD.....	50
FIGURA 2.8 COMPORTAMIENTO DE LA VARIABLE PROMEDIO DEL QUINTO ARMÓNICO DE CORRIENTE .....	51
FIGURA 2.9 VENTANA DEL TOOLBOX ANFIS DE MATLAB .....	57
FIGURA 2.10. ERROR DE ENTRENAMIENTO DEL ANFIS.....	59
FIGURA 2.11 FIS ALTURA DE LA ESCORIA.....	60
FIGURA 2.12. ERROR DE DATOS DE ENTRENAMIENTO.....	61
FIGURA 2.13 ERROR DE DATOS DE PRUEBA.....	61
FIGURA 2.14 ERROR DE DATOS DE CHEQUEO .....	61
FIGURA 2.15. SISTEMA DIFUSO ESTADO DE LA AGITACIÓN .....	62
FIGURA 2.16. SISTEMA DIFUSO CORRECCIÓN DEL FLUJO DESEADO .....	65
Figura 2.17 <i>MODELO PROPUESTO, CORRECCIÓN DEL FLUJO DESEADO</i> .....	67
Figura 2.18 Respuesta del Sistema con Tapón Normal .....	68
Figura 2.19 Respuesta del Sistema con Tapón usado.....	69
Figura 2.20 Respuesta del Sistema con Escoria Baja.....	69
Figura 2.21 Respuesta del Sistema con Escoria Alta.....	70
FIGURA 2.22 RESPUESTA DEL SISTEMA CON TEMPERATURAS ALTAS.....	70
FIGURA 2.23 ESTADO DE LA AGITACIÓN CON TAPÓN NORMAL.....	71
FIGURA 2.24 COEFICIENTE DE RESISTENCIA CON TAPÓN NORMAL.....	72
FIGURA 2.25 ESTADO DE LA AGITACIÓN CON TAPÓN DE 4 COLADAS.....	73
FIGURA 2.26 ALTURA DE LA ESCORIA .....	73
FIGURA 2.27 COEFICIENTE DE RESISTENCIA CON TEMPERATURAS ALTAS.....	74
FIGURA A2.1 DISTRIBUCIÓN DE LOS SUBCONJUNTOS BORROSOS DE KA.....	89
FIGURA A2.2 DISTRIBUCIÓN DE LOS SUBCONJUNTOS BORROSOS DEL PROMEDIO DEL QUINTO ARMÓNICO DE CORRIENTE .....	89
FIGURA A2.3 DISTRIBUCIÓN DE LOS SUBCONJUNTOS BORROSOS DE THD .....	90

*Lista de símbolos, términos especiales y abreviaturas no normalizadas*

---

FIGURA A2.4 DISTRIBUCIÓN DE LOS SUBCONJUNTOS BORROSOS DE IFE .....	90
FIGURA A2.5 DISTRIBUCIÓN DE LOS SUBCONJUNTOS BORROSOS DE COEFICIENTE DE RESISTENCIA.....	90
FIGURA A2.6 BASE DE REGLAS FIS ALTURA DE LA ESCORIA.....	91
FIGURA A2.7 VISUALIZADOR DE REGLAS DEL SISTEMA DIFUSO CORRECCIÓN FLUJO DESEADO .....	91
FIGURA A2.8 SALIDA DEL CONTROLADOR FUZZY EN FUNCIÓN DE LAS VARIABLES DE ENTRADAS.....	92
FIGURA A3.1 VARIABLE DE ENTRADA ALTURA DE LA ESCORIA.....	93
FIGURA A3.2 VARIABLE DE ENTRADA COEFICIENTE DE RESISTENCIA (COEFDR).....	93
FIGURA A3.3 VARIABLE DE ENTRADA ÍNDICE DE FLUJO EFECTIVO (IFE).....	94
FIGURA A3.4 VARIABLE DE SALIDA ESTADO DE AGITACIÓN.....	94
FIGURA A3.5 BASE DE REGLAS FIS ESTADO DE AGITACIÓN.....	95
FIGURA A3.6 VISUALIZADOR DE REGLAS DEL SISTEMA DIFUSO.....	95
FIGURA A3.7 SALIDA DEL CONTROLADOR BORROSO EN FUNCIÓN DE LAS VARIABLES DE ENTRADAS.....	96
FIGURA A4.1 VARIABLE DE ENTRADA ESTADO DE LA AGITACIÓN.....	97
FIGURA A4.2 VARIABLE DE ENTRADA FLUJO DESEADO .....	97
FIGURA A4.3 VARIABLE DE SALIDA CORRECCIÓN FLUJO DESEADO .....	98
FIGURA A4.4 BASE DE REGLAS FIS CORRECCIÓN DEL FLUJO DESEADO .....	98
FIGURA A4.5 VISUALIZADOR DE REGLAS DEL SISTEMA DIFUSO CORRECCIÓN FLUJO DESEADO .....	99
FIGURA A4.6 SALIDA DEL CONTROLADOR BORROSO EN FUNCIÓN DE LAS VARIABLES DE ENTRADAS.....	99

## **Lista de Tablas**

TABLA 1.1 RESUMEN DE LAS VARIABLES UTILIZADAS POR DIFERENTES AUTORES A PARTIR DEL ESTUDIO BIBLIOGRÁFICO .....	21
TABLA 2.1. MÉTODOS EMPLEADOS PARA DETECTAR EL ESTADO DE LA HOMOGENIZACIÓN EN EL HORNO CUCHARA .....	40
TABLA 2.2 CLASIFICACIÓN CUALITATIVA DE LOS EXPERTOS RESPECTO AL OJO METÁLICO Y LA AGITACIÓN DEL BAÑO METÁLICO.....	44
TABLA 2.3 COLADAS OBJETOS DE ESTUDIO EN EL HORNO CUCHARA ACINOX LAS TUNAS.	44
TABLA 2.4 RECOLECCIÓN DE DATOS VARIABLES INDEPENDIENTES.....	47
TABLA 2.5. RECOLECCIÓN DE PARÁMETROS ELÉCTRICOS .....	48
TABLA 2.6. TAMAÑO DEL OJO METÁLICO SEGÚN EXPERTOS .....	48
TABLA 2.7. ESTADO DE LA AGITACIÓN SEGÚN EXPERTOS.....	49
TABLA 2.8 DATOS DE LA COLADA 13939.....	51
TABLA 2.9 DATOS PROCESADOS .....	52
TABLA 2.10 COMPARACIÓN ENTRE LOS MÉTODOS DE OPTIMIZACIÓN.....	58
TABLA 2.11 SUBCONJUNTOS DIFUSOS ESTADO DE LA AGITACIÓN.....	63
TABLA 2.12. SUBCONJUNTOS DIFUSOS CORRECCIÓN FLUJO DESEADO.....	65
TABLA A.1.1 RECOLECCIÓN DE DATOS.....	86

## **INTRODUCCIÓN**

---

Desde nuestros antepasados la fabricación del acero posee una gran importancia para el desarrollo en general, dicho producto está presente en todos los procesos y actividades de la humanidad, por lo tanto, su producción ha alcanzado una gran evolución en cuanto a calidad y economía.

En Cuba también se produce acero, un ejemplo de estas empresas con valor importante en la economía del país es la Empresa de Aceros Inoxidables "ACINOX Las Tunas", la cual produce palanquillas de acero para la exportación y para su procesamiento en laminadores obteniendo productos con un destino posterior al encadenamiento productivo con otros sectores como el de la construcción.

ACINOX Las Tunas, es una empresa con alta representación para la población que busca ser más eficiente y ofrece empleo a más de 1000 trabajadores con el objetivo de mejorar su aporte a la economía y el nivel de vida de sus empleados y familias [1]. En ACINOX Las Tunas están identificados los principales indicadores que inciden directamente en los costos productivos, por ejemplo: la chatarra afecta alrededor de un 47 %, la electricidad un 27%, los refractarios un 11 %, los electrodos un 3 %, y otros portadores energéticos un 3 % [2].

Lograr que los indicadores mencionados tengan un comportamiento más favorable que lo alcanzado hasta el 2022 es el objetivo principal del proyecto "Automatización avanzada para la elaboración y afino del acero" con apoyo de varias universidades cubanas, especialmente la Universidad de Oriente [3].

Alrededor de un cuarto de la producción mundial de acero se produce por el método de Horno de Arco Eléctrico, donde se transforma la carga metálica en metal líquido con una composición química y temperatura específica. Luego, el metal se vierte a un recipiente denominado cuchara para su traslado a los diferentes métodos de la metalurgia secundaria como son: el Horno Convertidor al Oxígeno LD (descarburación con lanza de oxígeno por arriba), donde el calentamiento ocurre a través de las reacciones exotérmicas de los elementos químicos; la unidad de refinación de acero tipo Horno Cuchara como la del caso de estudio en ACINOX Las Tunas. Esta última realiza calentamiento por arco eléctrico y permite la formación de

una nueva escoria, adicionar ferroaleaciones para el ajuste y homogenizar la composición química y la temperatura, así como realizar desulfuración profunda, decantación de las inclusiones no metálicas del acero y eliminación de gases. [4]

En las antiguas acerías los procesos del afino del acero se hacían en los Hornos de Fundición, pero por su gran volumen era mucho más costoso y difícil. Entonces, la cuchara pasó a ser la protagonista del proceso y surge así la metalurgia secundaria. A partir de entonces, el Horno de Arco Eléctrico se convierte en un simple instrumento de fusión y pasa a primera línea el papel de la cuchara [5].

Dentro de las funciones del Horno Cuchara están el ajuste de la composición química y la temperatura, la homogenización de la composición química, la desulfuración, la defosforación, la descarburación, la desgasificación (reducción de la concentración de oxígeno, hidrógeno y nitrógeno), el control de la morfología de las inclusiones y la limpieza del acero (eliminación de inclusiones no metálicas).

Para ajustar estos parámetros, juega un papel determinante el insuflado de gas inerte como el argón o el nitrógeno. El proceso de agitación con nitrógeno en el Horno Cuchara se describe de la misma forma que el utilizado con argón, los dos gases son fríos, pero el nitrógeno tiene mayor capacidad para enfriar el metal que el argón, además de tener afinidad a formar inclusiones en el metal con otros elementos. En este trabajo se hace referencia fundamentalmente al argón ya que es el más usado en la producción del acero, no obstante, la investigación se considera válida para ambos.

El gas debe ser controlado para que adquiera valores adecuados de flujo al entrar a la cuchara, para esto existe una rampa con un lazo de control de flujo de gas encargada de mantener los valores deseados o establecidos por los operadores. A pesar de su experiencia, para estos es difícil considerar de manera adecuada perturbaciones presentes en el proceso, por ejemplo: variación de las dimensiones en el interior de la cuchara entre diferentes coladas, variación de la resistencia al flujo en el tapón poroso durante su vida útil, variaciones de la altura de la escoria, cambios de la temperatura del acero, entre otras.

Dichas perturbaciones no son tomadas en cuenta en el sistema de control automático existente en el caso de estudio. El mismo controla el flujo de gas

deseado, sin monitorear de manera directa o indirecta su impacto en la calidad del proceso de homogenización.

Generalmente, este tipo de industria de producción continua produce en las 24 horas del día, siendo necesario varios turnos de trabajo y operadores para el mismo proceso de Horno Cuchara. Sin embargo, no todos poseen la misma experiencia para seleccionar los valores de flujo deseado en el insuflado de gas inerte, lo cual propicia incertidumbre del control de la homogenización del acero entre los diferentes turnos de trabajo y los operarios.

En los reportes consultados para realizar esta investigación pudo conocerse que la problemática antes descrita ha sido considerada por otros autores. Todos reconocen que para que el insuflado de gas produzca una homogenización eficiente, es de gran importancia modernizar el sistema control, basado en esto, a lo largo del tiempo han surgido diversas iniciativas. Varias de ellas han considerado el control de la vibración sobre la carcasa de la cuchara, ya que el gas inerte al ingresar a la misma propicia vibraciones proporcionales al movimiento inducido por el caudal de gas que ingresa. Nupro Corporation desarrolló y comercializa el sistema conocido como TruStir, que se utiliza en diversas plantas desde principios del siglo XXI [6]. Otras empresas en China, Ramón, implementó un sistema similar [7].

Las universidades y centros de investigación no se han quedado rezagados, ejemplo: la Universidad Técnica Nacional de Donetsk, Ucrania [8]; la Universidad de Tecnología de Swinborne, Australia [9]; ArcelorMittal Research [10] y otras variantes de medición de las vibraciones en la cuchara con electromagnetismo [11].

Un inconveniente que puede tener esta alternativa para el caso de estudio son las interferencias con vibraciones provenientes de puentes grúa y del Horno de Arco Eléctrico.

También existen otras variables, por ejemplo: las que evalúan la efectividad de la homogenización mediante imágenes de la superficie del acero líquido en la cazuela, conocidas por identificar el diámetro del espacio libre de escoria u ojo metálico. Este tema ha sido estudiado por la Universidad de McMaster [12] y el centro de investigaciones de la siderurgia alemana (BFI), este último ha realizado aplicaciones

industriales en varias plantas Saarstahl (2009), ArcelorMittal Ruhrort (2010), Salzgitter Flachstahl(2012), Saarschmiede(2013), Deutsche Edelstahlwerke(2014).

La técnica de observación del ojo metálico puede tener inconvenientes en algunas plantas por deterioro de la calidad de la imagen debido a niebla causada por convección, lentes de protección, grietas, polvo, humo, adhesiones de escoria o acero u objetos en general que se interponen entre la cámara y la zona de interés (lanzas, electrodos). Avances informáticos han posibilitado programas para mejorar estas dificultades, como el desarrollado por BFI [13].

En Cuba solo existen dos empresas de este tipo, ACINOX Las Tunas y la Empresa Siderúrgica José Martí, (Antillana de Aceros) y no existen antecedentes de estudios que profundicen en la incidencia que tiene en la homogenización del acero la estrategia de automatización del sistema de insuflado de gas en el Horno Cuchara.

Los aportes de la bibliografía estudiada son una referencia importante para el desarrollo de este trabajo, no obstante, ha podido constatarse que existen particularidades que diferencian a los Horno Cuchara en las diferentes acerías. Por ejemplo, en el caso de estudio es pertinente considerar que el proceso metalúrgico de la planta puede propiciar valores de la altura de la escoria en la cuchara que suelen ser superiores a la media de otras plantas de acero similares.

En base a lo anterior se define como **problema científico** de esta investigación: Las insuficiencias del proceso de homogenización del acero en un Horno Cuchara, provocadas por un sistema de control de insuflado de gas sin capacidad de adaptar el valor deseado del flujo de gas inerte a las perturbaciones que afectan el proceso de homogenización.

Por todo lo anterior, podemos decir que el **objeto de investigación** es el proceso de homogenización a través del insuflado de gas en el Horno Cuchara. Además, por su influencia, el **campo de acción** se enmarca en: el sistema de control del insuflado de gas en el Horno Cuchara.

El insuflado de gas en el proceso de homogenización posee una gran importancia, porque incide en la calidad del producto y en la eficiencia de los procesos productivos en el Horno Cuchara. Depender de la experiencia y la incertidumbre en la toma de decisiones de los operadores para establecer el valor deseado de flujo de

gas y los tiempos de insuflado de este proceso, implica riesgos que pueden incidir de manera negativa en los costos energéticos y materiales.

Por lo antes mencionado, **el objetivo de la investigación** es diseñar un sistema borroso para ajustar el valor deseado en el control del insuflado de gas en el Horno Cuchara, en correspondencia con las perturbaciones para que el proceso de homogenización sea más efectivo.

Por lo tanto, se arriba a la siguiente **Hipótesis**: Si se diseña un sistema borroso para ajustar el valor deseado en el control del insuflado de gas en el Horno Cuchara, que sea capaz de compensar el efecto de las perturbaciones en este proceso, entonces se podrá realizar una corrección en línea del valor deseado del lazo de control y por lo tanto, se mejora la efectividad del proceso de homogenización del acero.

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

1. Caracterizar desde el punto de vista teórico, histórico y contextual los sistemas de control de homogenización del acero a través del insuflado de gas en el Horno Cuchara.
2. Realizar estudio para seleccionar las variables de proceso o perturbaciones que más inciden en el proceso de homogenización del acero en el Horno Cuchara.
3. Determinar instalación experimental, experimentos y formas de recolección de datos para las variables seleccionadas que reflejan relación con el estado de la agitación mediante insuflado de gas, bajo condiciones típicas del proceso de homogenización.
4. Diseñar un sistema o modelo borroso, a partir del análisis de los datos y el intercambio con los expertos, que refleje el efecto de las perturbaciones en ese proceso y que permita la corrección en línea del valor deseado del lazo de

control de flujo del insuflado de gas en el proceso de homogenización del acero en el Horno Cuchara.

5. Realizar la valoración del sistema borroso propuesto, para el caso de estudio, a escala de simulación en Matlab®.

Para la realización de esta tesis se emplearán métodos de investigación teóricos y experimentales.

Entre los teóricos se inició con el método histórico-lógico realizando la revisión bibliográfica sobre sistemas de control del insuflado de gas en Hornos Cuchara, que utilizan sensores sobre el efecto directo del agitado del metal líquido, con vista a su posible adaptación al actual proceso.

Se profundiza en el estudio de procesamiento de señales, su influencia de acuerdo a sus variaciones, para aplicar el método hipotético-deductivo que permitió elaborar el marco teórico y la hipótesis de investigación.

Con métodos estadístico descriptivo se investigaron los datos históricos de proceso y los de los experimentos realizados, para organizar y clasificar indicadores cuantitativos y conocer afectaciones causadas por la falta de un sistema de control confiable del insuflado de gas en el Horno Cuchara, ya sea por averías como fugas del tapón poroso, o por baja homogenización del acero entre los diferentes turnos.

El uso de métodos experimentales, como el diseño y la simulación, utilizando la herramienta de software Matlab®, fueron utilizados para el procesamiento de datos de las variables y para la evaluación del comportamiento del sistema propuesto cuando ocurren los eventos de mayor importancia. Además, con el método de encuesta y el de análisis de alternativas se pudo corroborar que el comportamiento de los resultados de simulación ofrece un buen control del proceso de homogenización.

**Aporte de la investigación y significación práctica.**

Con la presente investigación se logrará diseñar un sistema borroso capaz de manejar variables que reflejen el efecto directo de las perturbaciones en ese proceso y permita la corrección en línea del valor deseado del lazo de control de flujo del insuflado de gas.

Con este sistema además de incrementar la calidad del acero, se puede reducir los costos de producción y lograr mayor confiabilidad del sistema de control del insuflado de gas en el Horno Cuchara.

El informe de esta investigación se organiza en introducción, desarrollo que contiene dos capítulos, las conclusiones, las recomendaciones, las referencias bibliográficas y los anexos.

En el primer capítulo, se presentan los fundamentos teóricos de los procesos de homogenización del acero a través del insuflado de gas y su control en los Hornos Cuchara y se realiza una revisión bibliográfica con un enfoque dirigido a justificar el planteamiento de la hipótesis.

En el segundo capítulo, se describen los métodos de medición de las diferentes variables, para establecer las especificaciones y el diseño del sistema borroso. Se realiza un análisis cualitativo y cuantitativo para comparar los resultados obtenidos. Posteriormente se evalúa el funcionamiento del sistema propuesto a través de la simulación, con el uso de una herramienta de software y mediante los métodos de encuesta y de análisis de alternativas.

## **Capítulo 1 FUNDAMENTOS TEÓRICOS PARA EL DISEÑO DE UN SISTEMA BORROSO PARA AJUSTAR EL VALOR DESEADO EN EL LAZO DE CONTROL DEL INSUFLADO DE GAS EN EL HORNO CUCHARA.**

---

---

### **INTRODUCCIÓN**

En este capítulo se incursiona en las características de los procesos de homogenización a través del insuflado de gas en los Hornos Cuchara y los problemas asociados a deficiencias en sus sistemas de control de insuflado de gas.

Se realiza una búsqueda bibliográfica profunda para fundamentar la hipótesis de la tesis. Se abordan los basamentos teóricos del campo del conocimiento relacionado con los temas que serán objeto de la investigación, analizando su utilización en las propuestas de diseño de sistemas de control de insuflado de gas en el Horno Cuchara, desde una perspectiva crítica que permita obtener los fundamentos teóricos para la selección y diseño del sistema borroso.

Por último, se estudian las herramientas del MatLab® para su utilización en la simulación del sistema borroso propuesto y para el tratamiento de las variables seleccionadas.

### **1.1 SISTEMAS DE HOMOGENIZACIÓN DEL ACERO A TRAVÉS DEL INSUFLADO DE GAS EN LOS HORNOS CUCHARA.**

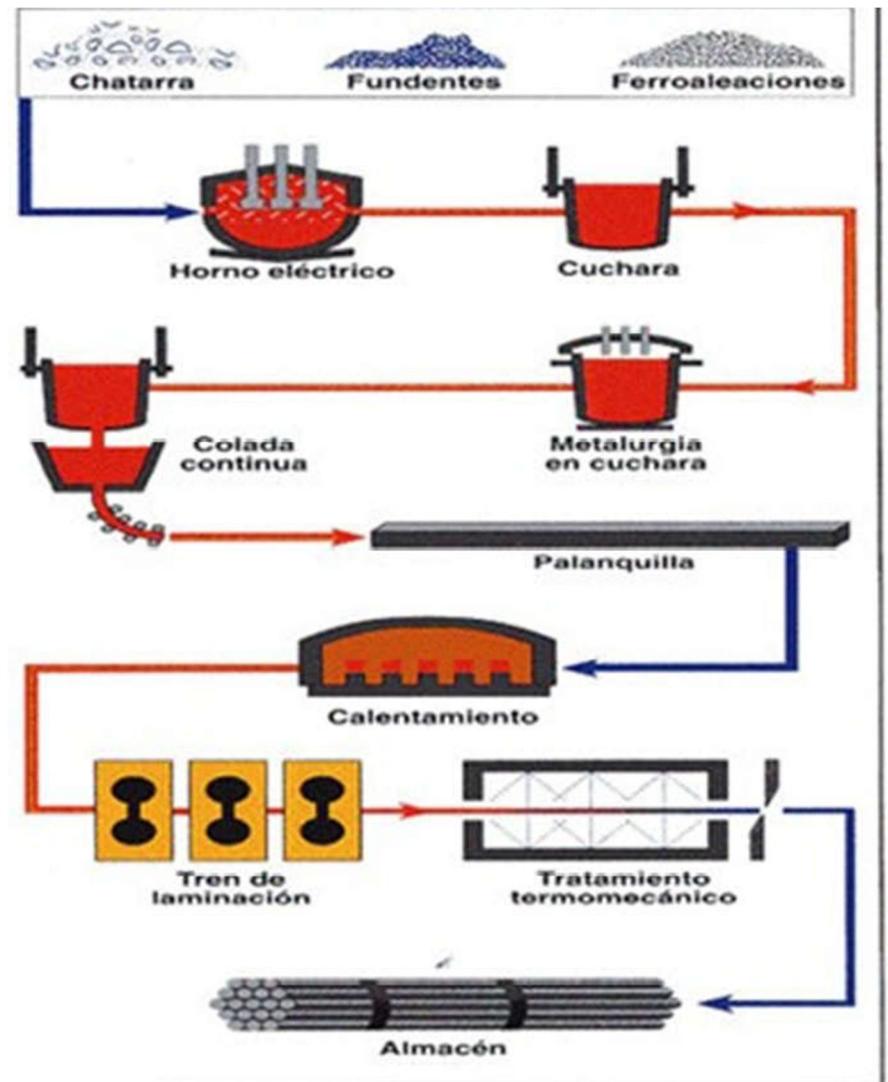
Desde la edad de hierro hasta la década de los 70, todos los procesos metalúrgicos y su desarrollo eran concebidos en los Hornos de Arco Eléctrico. Las cucharas eran simples recipientes de transporte del acero líquido, en esos años la principal preocupación era la productividad.

Con la crisis del petróleo de 1973, se produce un vuelco total en el mercado siderúrgico por su fuerte dependencia energética, a partir de entonces se debía fabricar con mejor calidad y a bajos costos, para mantener la competencia del mercado, entonces se traslada a la cuchara, todas aquellas etapas de proceso que no necesariamente deban desarrollarse dentro del Horno de Fundición.

Nace así la denominada «metalurgia en cuchara» o también denominada «metalurgia secundaria» que se refleja en la Figura 1.1. De esta manera, el horno se

convierte en un simple instrumento de fusión y pasa a primera línea el papel de la cuchara. [5]

Al mencionar el sistema de homogenización del acero en el Horno Cuchara estamos hablando de uno de los procesos más importantes de la metalurgia secundaria. En el mismo, al acero líquido proveniente del Horno de Arco Eléctrico se le eliminan impurezas como azufre, oxígeno e inclusiones no metálicas, las cuales restan su calidad. Luego, quedará listo para ser solidificado en moldes y obtener las palanquillas o planchones con las características deseadas. [14]

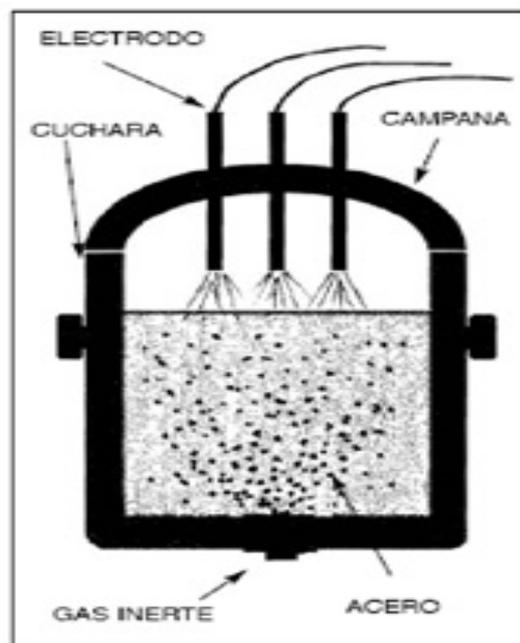


*Figura 1.1 La Cuchara En El Proceso De Fabricación Del Acero.*

En el horno cuchara representado en la Figura 1.2 se realizan operaciones de afino como el ajuste preciso de los elementos de aleación, la homogenización y control de la temperatura y de la composición química, la descarburación, desulfuración, defosforación, desoxidación, desnitrógenación y deshidrogenación. Para lo anterior se necesitan los siguientes materiales:

- Argón, gas inerte que no altera la composición química y que sirve para homogeneizar la masa de acero en composición y temperatura.
- Adiciones, materiales que se añaden al acero para ajustar su composición, generalmente son aleaciones de hierro.
- Desulfurante, compuesto generalmente de calcio, que tiene la propiedad de combinarse con el azufre del acero y depositarlo en la escoria.

Siempre que se añaden los elementos mencionados se sopla gas inerte para homogeneizar el baño, de aquí la importancia del control del insuflado del gas. Para elevar la temperatura se emplea el calor desprendido por un arco eléctrico que salta entre unos electrodos. [13]



*Figura 1.2 Esquema Horno De Cuchara.*

El Horno Cuchara de ACINOX Las Tunas se ilustra en la Figura 1.3, cuenta con tres electrodos de grafito de 300 mm, una cuchara de 60 toneladas de capacidad de acero líquido y el refractario es del tipo básico.



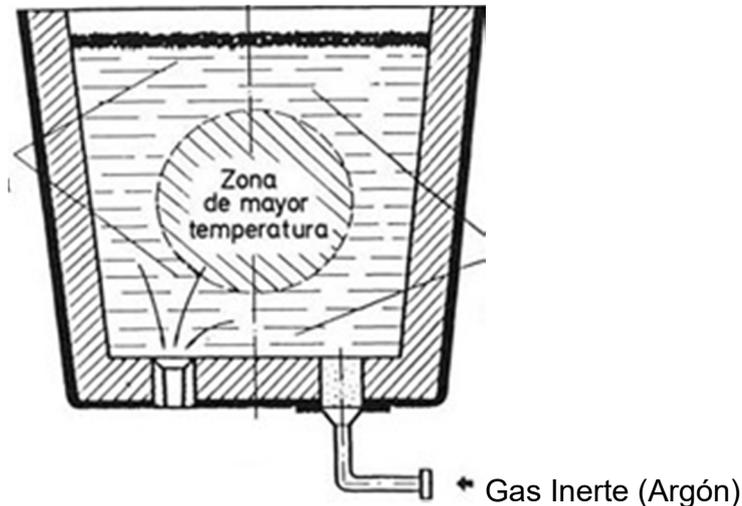
*Figura 1.3. Horno Cuchara De Acinox Las Tunas.*

### **1.1.1 SISTEMA DE INSUFLADO DE GAS EN LOS HORNOS CUCHARA.**

Uno de los procesos más importantes que ocurren en el Horno Cuchara es la homogenización del acero líquido con el fin de alcanzar una buena elaboración o ajuste del producto final. Para ello se utiliza el insuflado de argón o de nitrógeno por el fondo de la cuchara, como gas propulsor, logrando altos caudales de circulación sin la necesidad de un equipo más costoso para agitar la cuchara.

La operación de afino permite una mejora sustancial de la reactividad de las aleaciones y con ello un ahorro considerable de las mismas. Las burbujas

ascendentes del gas, además de acelerar el acero, arrastran partículas no metálicas y los gases diluidos en él, como el H<sub>2</sub>, CO y N<sub>2</sub>, llegando a alcanzar en el recipiente velocidades de hasta 6 m/s.



*Figura 1.4 Insuflado De Gas En Horno Cuchara.*

Propiedades Básicas del argón en el proceso de insuflado:

- Actuación física: diferencia de presión de las burbujas de argón y la de los gases perjudiciales disueltos en el metal, siendo éstos absorbidos y transportados a la superficie.
- Acción química: actúa como catalizador aumentando la velocidad de reacción entre el carbono y el O<sub>2</sub>, el cual se extrae en forma de CO mediante un proceso de oxidación química, desprendiéndose en forma de burbujas.
- Acción purificadora: en las burbujas ascendentes se acumulan las partículas en suspensión de la colada, que serán llevadas hacia arriba a la escoria, propiciando una limpieza adicional y automática de la colada.

La acción desgasificadora resulta muy favorecida con la disminución del diámetro de las burbujas y el aumento del tiempo de permanencia de éstas en la colada. Según la fórmula de Stokes, para una temperatura constante, la velocidad de las burbujas en la colada es proporcional al cuadrado del radio de las mismas. Por tanto, burbujas más pequeñas permanecen más tiempo en la colada.

La presión de insuflado de gas en una cuchara debe superar la presión ferrostática en el fondo de dicho recipiente. Generalmente, se utiliza una mayor presión inicial, para descender luego a un burbujeo fino que favorezca la eliminación de las inclusiones y partículas de escoria.

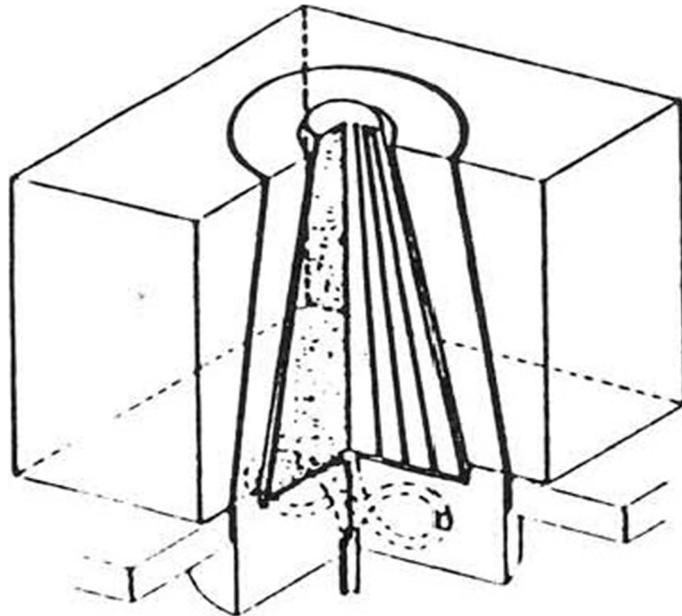
Existen pérdidas de temperatura de la colada debido a la absorción de calor que realiza el argón introducido al calentarse, aunque se compensa favorablemente por la homogeneización que se alcanza en el acero líquido.

Ventajas del insuflado de gas argón en las cucharas de acero:

- Unificación de la caída de temperaturas en la cuchara y ajuste de la misma.
- Mejora de la limpieza del acero al transportar las impurezas no metálicas a la escoria.
- Mejora de la eliminación parcial de los gases como N<sub>2</sub>, y O<sub>2</sub>.
- Mejora del rendimiento de los elementos de adición.
- Mejora de la colabilidad del acero.
- Como apoyo de los sistemas de desgasificación parcial para reducir la presión parcial del gas a eliminar; por ejemplo, el CO.

La forma de insuflar el argón hacia el interior de la cuchara es a través de los elementos refractarios colocados en el fondo. Para esta dura tarea los productores de refractarios debían ofrecer a la industria del acero un material que le sirva para cumplir todas las propiedades indicadas hasta ahora y además ser seguro, fiable, y permeable para paso al volumen y presión de gas requerido. Las burbujas de gas debían ser pequeñas y numerosas para cubrir la mayor área de la superficie metálica en el tiempo más breve posible.

Para cumplir con lo mencionado, fue mayoritaria la utilización de refractarios de tipo cónico, normalmente basados en alta permeabilidad, insertados en bloques de sujeción (porta-tapón) y colocados en el revestimiento del fondo de la cuchara como se ilustra en la Figura 1.5 [5]



*Figura 1.5 Sistema Porta Tapón Poroso.*

## **1.2 SISTEMAS DE CONTROL DEL INSUFLADO DE GAS EN LOS HORNOS CUCHARA.**

Por su importancia el insuflado de gas debe ser controlado, para esto se fijan valores de flujo de gas inerte (argón o nitrógeno) en función de las operaciones que se realizan en la cuchara, como adición de ferroaleaciones, calentamiento, desulfuración, flotación de inclusiones o mantenimiento. Estos valores deseados se suelen establecer desde una computadora para supervisión y control del proceso.

En los reportes bibliográficos consultados se pudo identificar perturbaciones que los autores han tenido en cuenta porque afectan el proceso de insuflado de gas en un horno cuchara. Por ejemplo, son numerosas las investigaciones realizadas con el objetivo de optimizar el proceso de la homogenización del acero en el Horno Cuchara. Este agregado es uno de los puntos claves para la calidad del producto terminado y para la eficiencia de la empresa. En tal sentido, en 1983 Themelis [15] estudia las burbujas de gas disueltas en el metal, así como la proporcionalidad que existe entre la cantidad y el flujo de gas.

Como es conocido y por la importancia que refleja el estudio del ojo metálico, así como la creación de modelos físicos y matemáticos, varios investigadores profundizan en su simulación. Por ejemplo, Manabu Iguchi en el 2004 [16] , Mazumdar [17] e Iguchi y otros [16] también en ese año, Krishnapisharody en el

2006 B, en el 2008 [18], en el 2012 [19] y en el 2015 [20]. Graham en el 2007 O, Thunman y Otros en ese mismo año [21], Li, Yin, Zhou en el 2008 [22], Peranandhathan y Mazumdar en el 2010 [23], XD Xu, Brooks, Yang, & Curic en ese año también[24]. Lou & Zhu en el 2013 [25], (Liu, He, & Pan en el 2014 [2], Huang, Harmuth, Doletschek, Vollmann, & Feng en el 2015 (Huang, Harmuth, Doletschek, Vollmann, & Feng, 2015), (Chatterjee & Chattopadhyay en el 2016 [26] , (R [27], Lv, Wu, Wang, Dong, & Su[28] y Dipak Mazumdar, Dhandapani, & Sarvanakumar en el 2017 [29], y González-Bernal y otros en el 2018[30],

En el año 2003 Takahashi, Kamo, Kurose, y Nomura [31] se refieren a como el tapón poroso influye en el resultado de la agitación del metal. En el 2004, Kushnarev [32] también aborda este tema. En el 2006 Ramírez-Argáez, Tapia, Espinoza, y Alcantar [33] lo estudian con ayuda de un modelo físico matemático. Más recientemente, en el 2018, Cao y Nastac [34] profundizan en el tema.

También muchos investigadores utilizaron las señales vibro acústicas para el estudio de los fenómenos ocurridos en el Horno Cuchara. Tal es el caso de Yuriy y otros en el 2007 [8], Kostetskii y otros en el 2009 [11], Pylvänäinen [35], y Jaefer Yenus, Geoffrey Brooks, & Michelle Dunn, en el 2016 [18], Yenus en el 2017[36], Yenus, Brooks, Dunn y autores en el 2018 [37], [27], [13], Alia, Pylvänäinen, Visuri, John, & Ollila, en el 2019 [38] y Xiaodong Xu. En el año 2010, Brooks y Yang [39] combinan el procesamiento de imágenes y las señales vibro acústicas.

La Tabla 1.1. ilustra de forma resumida las perturbaciones antes mencionadas. En la misma puede observarse como los diferentes autores estudian las variables relacionadas con los fenómenos que ocurren en el proceso de Homogenización del horno Cuchara a través del insuflado de gas. A continuación, se detallan los artículos y las variables estudiadas por cada autor.

*Capítulo 1. Fundamentos teóricos para el diseño de un sistema borroso para ajustar el valor deseado en el lazo de control del insuflado de gas en el horno cuchara.*

**Tabla 1.1 Resumen De Las Variables Utilizadas Por Diferentes Autores A Partir Del Estudio Bibliográfico**

Autor Principal	Año	Variables								
		Tapón Poroso	Factor/ Forma	Masa líquido	Ojo metálico	Flujo de Gas	Tempn	Altura Escoria	Vibro acústica	Presión del gas
Themelis, NJ	1983	1		1		1				
A. ALONSO GARCIA	1989	1	1				1			1
Takahashi, D	2003	1								
Cemalettin Kubat	2004		1	1		1	1			
Kushnarev, AV	2004	1					1			
Iguchi, Manabu	2004	1	1		1	1	1	1		
Mazumdar, D	2004	1			1	1	1	1		
Dr. Richard Fruehan	2005				1	1		1		
Krishnapisharody, ,	2006		1		1	1		1		1
Ramírez-Argáez,	2006	1	1	1		1				
Graham, KJ	2007		1		1	1		1		
Thunman, Mikael	2007		1	1	1	1		1		
Yuriy, Kostetsky	2007								1	
Krishnapisharody,	2008		1		1	1		1		
Li, Baokuan	2008	1	1	1	1	1		1		
Kostetskii, Yu V	2009					1			1	1
Peranandhanthan, M	2010	1	1	1	1	1		1		
Xu, XD	2010		1		1	1	1	1		
Xu, Xiaodong	2010				1				1	
Krishnapisharody,	2012	1	1	1	1	1				
Lou, Wentao	2013		1	1		1				1
Liu, Yan-He	2014	1	1		1	1		1		
Chatterjee, Saikat	2015		1		1	1		1		
Huang, Ao	2015		1		1	1	1	1		
Krishnapisharody, K	2015		1	1	1	1		1		
Li, Linmin et al.	2015				1	1		1		
Chatterjee, Saikat	2016				1	1				
Pylvänäinen, Mika	2016					1	1		1	
Andrea Inés Romero	2016				1					
Yenus, Jaefer	2017		1	1		1	1	1	1	1
Carrillo Campos	2017	1	1		1	1	1			
García Suárez, Adrián	2017		1	1		1	1			1
Ning-ning LV	2017		1		1	1		1		
D. Mazumdar	2017		1		1	1	1	1		
Yenus, Jaefer	2017					1	1		1	
Moreno, Alberto	2017						1			1

*Capítulo 1. Fundamentos teóricos para el diseño de un sistema borroso para ajustar el valor deseado en el lazo de control del insuflado de gas en el horno cuchara.*

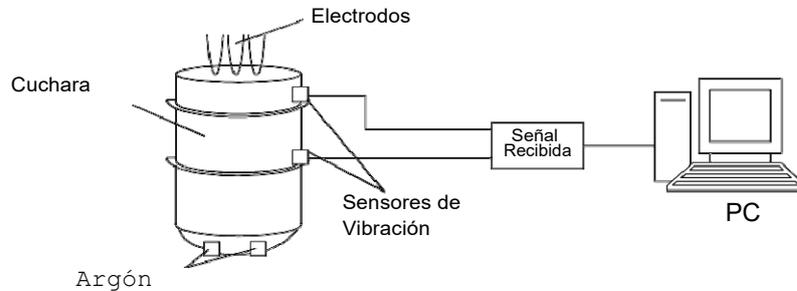
Cao, Qing	2018				1	1	1	1		
SAIKAT CHATTERJEE	2018		1	1	1			1	1	
González-Bernal	2018		1				1			
Madías, Jorge	2018	1			1	1			1	1
Yenus, Jaefer et al.	2018	1	1		1	1	1	1	1	
Yenus, Jaefer et al.	2018		1		1	1	1	1	1	
Yenus, Jaefer et al.	2018	1	1	1		1	1	1	1	
Alia, Najib et al.	2019	1	1					1	1	
Nikolaev, AA et al.	2019	1			1	1	1	1		1
<b>Total artículos X Variable</b>		<b>16</b>	<b>28</b>	<b>12</b>	<b>27</b>	<b>35</b>	<b>19</b>	<b>25</b>	<b>11</b>	<b>9</b>

Generalmente, como menciona Jorge Madías en el artículo Sistemas de Control [40], existen varios caminos para modelar el comportamiento del metal líquido en el Horno Cuchara. En algunos casos de los sistemas de control del insuflado de gas el operador reajusta el caudal en función de la situación que observa en la superficie del baño. En muchos casos el sistema de control de flujo del insuflado de gas realiza una corrección en línea del valor de referencia del lazo. Dentro de estos sistemas de control que han surgido se encuentran los siguientes:

- Control de la vibración sobre la carcasa de la cuchara, tiene en cuenta que el gas inerte al ingresar a la cuchara genera vibraciones proporcionales al caudal que realmente ingresa y se utiliza desde principios del siglo XXI. Su desventaja es que pueden surgir interferencias con vibraciones provenientes de la grúa y el Horno de Arco Eléctrico.
- Control de la apertura del ojo (separación de la escoria desde el centro hacia las paredes de la cuchara, dejando acero expuesto a la atmósfera), que se produce durante el agitado. Su desventaja es que depende de las características de la escoria y no siempre aportan la información deseada en casos como el de la planta que se estudia.
- Control del insuflado basado en modelos físicos-matemáticos.

Uno de los ejemplos de uso de los sistemas de control en el proceso de insuflado de gas es el realizado por investigadores del Departamento de Electrometalurgia de la Universidad Técnica Nacional de Donetsk. Estos han desarrollado una serie de experimentos de laboratorio en cooperación con OOO Zvukoulavlivayushchaya

Apparatura y NPO Doniks, entre ellos diseñaron una muestra experimental para un sistema de monitorización vibro acústica del Horno Cuchara como se muestra en la Figura 1.6. El mismo fue probado en la planta de conversión de las obras metalúrgicas de Enakievo [11].



*Figura 1.6. Diagrama Esquemático Para Registrar Datos Sobre La Vibración.*

Las señales de los sensores de vibración, fijados a la carcasa del Horno Cuchara, se entregan a una computadora para ser almacenadas y analizadas con un paquete de software especial que ejecuta las siguientes funciones:

- 1- Procesamiento y análisis de señales de vibración para obtener información sobre los parámetros de trabajo de las unidades de insuflado.
- 2- Visualización de información sobre el funcionamiento de arcos eléctricos y unidades de insuflado.
- 3- Archivo de señales de vibración.

Como resultado de estudios realizados en una cuchara de 150 t, se encontró una relación entre el Valor RMS de la vibro-senal y el caudal de argón durante el insuflado obteniendo la siguiente ecuación:

$$VRMS = 0.0012Q^{0.3796} \quad (1.1)$$

Basados en los resultados de laboratorio y los estudios de la técnica propuesta a escala de monitoreo, se diseñó un sistema informático con fines especiales (Argo-N) para controlar el proceso de insuflado. Su función es el control asistido por computadora del caudal de gas inerte durante el tratamiento de un metal en el Horno Cuchara.

El insuflado se controla utilizando datos sobre la actividad de vibración en la superficie de la cuchara y con los datos suministrados de otras variables como temperatura y presión.

El propósito del sistema de monitoreo diseñado es aumentar la eficiencia del control tecnológico en el proceso de tratamiento del acero en el horno cuchara, presentando datos adicionales al operador sobre la intensidad de la mezcla de metales y el funcionamiento de las unidades de insuflado.

Con estos datos en la computadora, se puede disminuir el consumo de energía eléctrica, disminuir el consumo de refractarios, mejorar la calidad del acero, aumentar la vida útil de las unidades de insuflado, descifrar el estado técnico real de la cuchara de acero y evitar situaciones de accidentes relacionados con una falla en las unidades de insuflado.

El sistema diseñado no afecta la operación del sistema de control de fusión existente y permite a un operador controlar la velocidad de flujo del gas inerte, tanto automática como manualmente.

El paquete de software del sistema Argo-N puede operar en los siguientes regímenes:

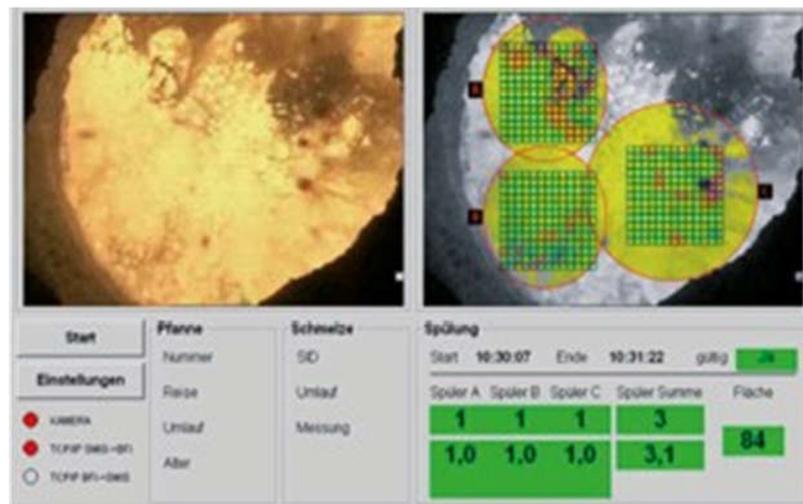
- 1- **Régimen de indicadores**, es la operación principal del sistema en condiciones industriales. Se muestran en la pantalla los resultados finales del control de los parámetros de operación de las unidades de insuflado en modo de tiempo real.
- 2- **Régimen de indicación extendida**, determina los valores de los parámetros ajustables cuando el sistema se ajusta, se usa durante la operación si es necesario para analizar los parámetros determinados de unidades de insuflado en un intervalo de tiempo dado (los parámetros se presentan en forma de curvas). Los resultados finales e intermedios de controlar los parámetros de las unidades de insuflado se presentan en la pantalla en modo de tiempo real.
- 3- **Régimen de pos-procesamiento**, determina los valores de los parámetros ajustables cuando el sistema está equilibrado. Los resultados

finales e intermedios de controlar los parámetros de las unidades de insuflado de un archivo grabado anteriormente se presentan en la visualización.

4- **Régimen de ajuste**, configura los valores de los parámetros durante el ajuste del sistema (los valores de umbral de la toma de decisiones, los tiempos de las señales de vibración registradas, los rangos de frecuencia a analizar, la velocidad de actualización de la información en una pantalla, los parámetros de un tipo de acero, entre otros).

Otro resultado es el obtenido en el Centro de investigaciones de la siderurgia alemana (BFI), evaluando un proceso de agitado en Salzgitter Flachstahl, a partir del año 2009. Mediante el programa de procesamiento de imágenes desarrollado se evalúa la señal de video de una cámara que opera en el rango de longitud de onda visual. Los eventos de agitado se analizan a pedido del operador, en la región circular del ojo, coincidiendo con el tapón poroso.

El resultado puede ser calificado de 1 (agitado bueno) a 3 (sin agitado). La evaluación es notificada al operador sobre la interfaz del usuario. El valor se resalta en verde, amarillo o rojo. En la Figura 1.7 se muestra también la imagen obtenida y la imagen analizada. El programa se comunica vía TCP/IP con el sistema de control de procesos de la empresa para dejarlo documentado.



*Figura 1.7. Programa De Procesamiento De Imágenes.*

En el proceso pueden presentarse situaciones de deterioro de la calidad de la imagen debido a la niebla causada por convección, lentes de protección, grietas,

polvo, humos, adhesiones de escoria o acero y objetos en general que molestan entre la cámara y la zona de interés (lanzas, electrodos). Por esta causa, en la fase inicial de ensayo, el programa pudo responder al 58% de los pedidos de evaluación, luego de las mejoras del software y del entrenamiento del operador, se logró respuesta positiva en el 90% de los casos.

En la Figura 1.8 se presentan ejemplos de limitación del campo visual por adhesiones de acero o escoria; humo entre la cámara y la superficie del acero líquido y agitado sin lograr la apertura del ojo metálico. El programa también fue mejorado para intentar detectar estos eventos.



*Figura 1.8. Limitación Del Campo Visual Por Adhesiones De Acero/Escoria, Humo Entre La Cámara Y La Superficie Del Baño Y Agitado Sin Apertura Del Ojo*

No obstante, persisten desventajas o limitaciones cuando la cámara y el programa deben diferenciar entre escoria muy fría y adhesiones o una capa de escoria caliente muy delgada y el acero líquido. Para este último caso se recomienda el uso de una cámara que funcione en el rango infrarrojo. Con este sistema se logra el monitoreo directo del efecto del agitado, en lugar del monitoreo del flujo de gas, realimentando inmediatamente al operador y permitiendo documentar de manera objetiva el proceso de agitado en el sistema. [41].

En la Planta Tenaris Siderca de Argentina se desarrolló otra solución. La misma produce tubos de acero sin costura, principalmente destinados a la industria del gas y el petróleo. En el Horno Cuchara se implementó un sistema con cámara para

*Capítulo 1. Fundamentos teóricos para el diseño de un sistema borroso para ajustar el valor deseado en el lazo de control del insuflado de gas en el horno cuchara.*

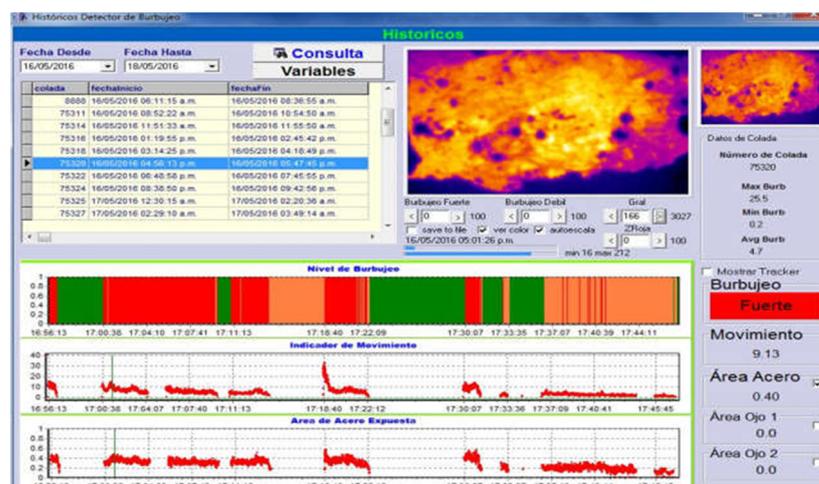
evaluar el burbujeo de argón, en la cabina de control se encuentra disponible un monitor que permite visualizar en tiempo real la zona de burbujeo y la escoria, minimizando la exposición de los operadores a las proyecciones de acero líquido y escoria.

La Figura 1.9 ilustra imágenes procesadas por una aplicación que las almacena con fecha y número de colada. Esto permite evaluar en forma off-line cómo fue el burbujeo en una determinada colada y realizar control de operación, detectar desvíos y analizarlos. Por ejemplo, es posible determinar si hubo un agitado deficiente o excesivo cuando no correspondía.

La aplicación cuenta con un sistema que permite analizar el área del ojo metálico generando gráficos con el nivel de burbujeo, clasificándolo en: fuerte, moderado y suave. También determina la intensidad de movimiento y el área de acero expuesta en función del avance de colada.

Para asegurar un correcto funcionamiento, las cámaras y demás componentes deben ser mantenidos en forma sistemática. Además, las bóvedas de las estaciones donde se encuentran estas cámaras fueron modificadas, instalando una puerta de protección que se activa en forma neumática y protege a la cámara de las proyecciones de acero y escoria.

El sistema dispone de una lógica que determina los períodos de tiempo en que no hay riesgos para que la cámara esté filmando y aquellos en que conviene cerrar la puerta para protegerla. Por ejemplo, cuando los electrodos toman contacto con el acero, en la inyección de alambres y adición de ferroaleaciones, entre otras.



*Figura 1.9. Sistema Para Visualizar El Burbujeo De Argón En La Cuchara.*

### **1.2.1 INSUFICIENCIAS EN EL SISTEMA DE CONTROL DEL INSUFLADO DE GAS EN EL HORNO CUCHARA.**

En el epígrafe anterior se caracterizó el proceso de homogenización del acero a través del insuflado de gas y todas las variables que existen en este. Es notable que las soluciones de control que se han reportado, no logran compensar de manera adecuada el efecto de todas las perturbaciones principales que ocurren en este proceso y esto puede ser acentuado en el caso de estudio por las peculiaridades del mismo que lo diferencian del proceso en otros Horno Cuchara.

Como se observa en el epígrafe 1.2, Tabla 1.1, la estructura del tapón poroso la estudiaron 19 autores, al Factor de Forma (altura y ancho de la cazuela) 28 autores, la masa del acero líquido 12 autores, el ojo metálico 27, el flujo de gas 35, la temperatura del acero 19, la altura de la escoria 25, la actividad vibro-acústica 11 y la presión del gas 9. Además, se evidencia que a pesar de estar presentes todas las perturbaciones, cuando los autores utilizan algunas, no siempre se toman en cuenta otras. Por ejemplo, cuando se utiliza vibración no se analiza la temperatura o la calidad del tapón, o cuando se estudia el ojo metálico no se tuvo en cuenta la calidad de la escoria y ello puede implicar la omisión de aspectos que ayudan a una descripción más real del proceso.

Para el caso de estudio, donde típicamente la altura de la escoria en el Horno Cuchara puede ser incluso superior a los niveles en otras acerías, se debe tener siempre presente esta variable perturbadora. En esta planta el Horno de Arco Eléctrico (HAE) es del tipo piquera, lo que provoca que se depositen altos niveles de escoria hacia la Cuchara durante el vertido del acero líquido. Otra diferencia es que el HAE del caso de estudio no posee una jaula anti ruido, como se expone en [42], lo que puede provocar interferencias en variables vibro-acústicas.

En el caso de estudio, el proceso comienza antes del vertido a la Cuchara para conectar la manguera de agitación de argón o nitrógeno. Luego, para realizar el suministro del gas se debe tener en cuenta la presión en la rampa y se ajusta el flujo en la misma. Las Figura 1.10 y 1.11 muestran las partes fundamentales del sistema en el caso de estudio.

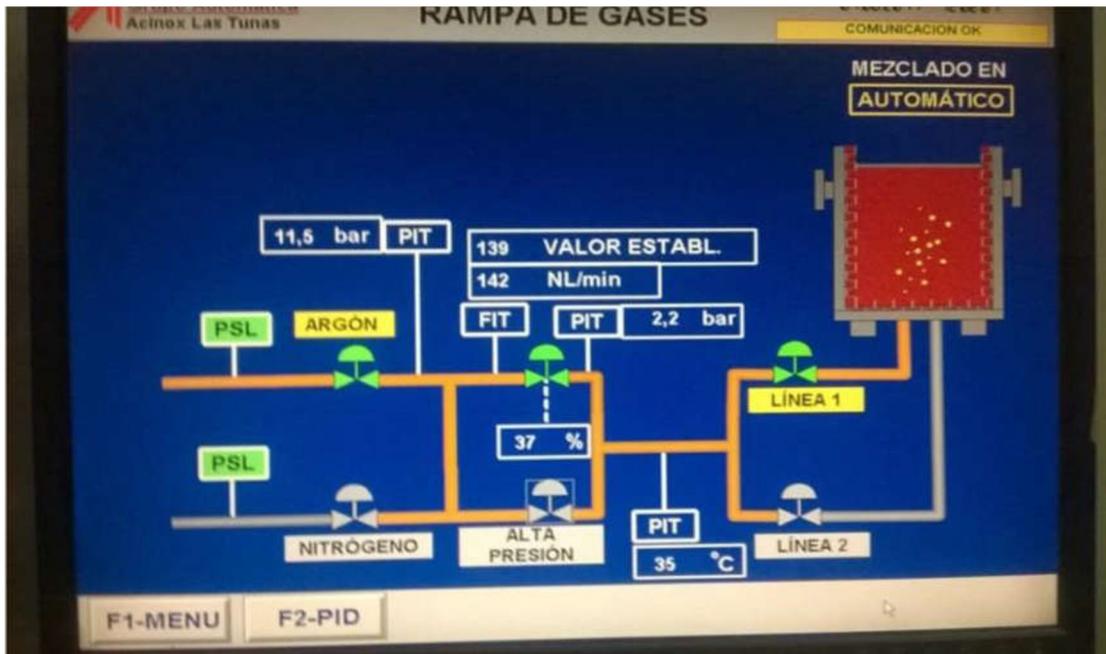


Figura 1.10. Visualización De La Rampa Distribuidora Del Gas (Argón Y Nitrógeno).



Figura 1.11. Rampa Distribuidora Del Gas (Argón O Nitrógeno)

La rampa es la encargada de suministrar el gas a utilizar (Argón o Nitrógeno), controlando de forma automática el flujo de entrada a la cuchara. La visualización y

*Capítulo 1. Fundamentos teóricos para el diseño de un sistema borroso para ajustar el valor deseado en el lazo de control del insuflado de gas en el horno cuchara.*

los datos recogidos durante el proceso de insuflado de gas en el Horno Cuchara se reflejarán en la pantalla de visualización de la Figura 1.12 correspondiente al insuflado en la aplicación SCADA (Supervisión, Control y Adquisición de Datos) del proceso.

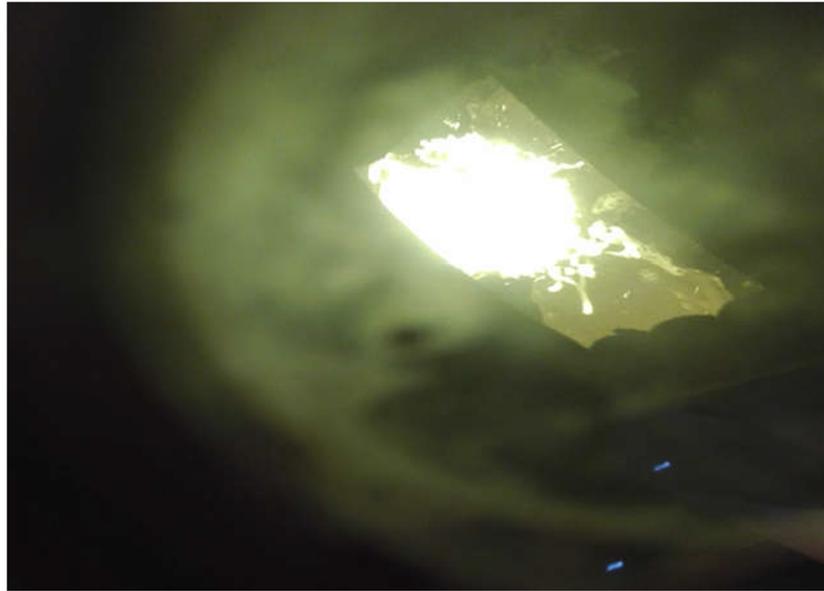


*Figura 1.12. Aplicación Scada Del Proceso En El Horno Cuchara.*

El flujo del gas de insuflado debe iniciar en 120 l/min y la presión de entrada a la rampa debe ser mayor a 10 bar. La presión de salida de la rampa, lugar de entrada al tapón poroso, debe encontrarse entre 1,5 a 3 bar, antes de recibir el acero líquido.

El flujo de gas se regula para evitar que durante la agitación no exista derrame de acero o escoria por encima del borde de la cazuela. La presión con que debe entrar el gas a la cuchara es ajustada en correspondencia con la presión ferrostática que ejerce el metal líquido al fondo de la cazuela.

El flujo es ajustado automáticamente a partir del valor deseado, que es introducido por el operador manualmente, guiándose por el ojo metálico que se crea en la superficie del metal líquido, figura 1.13, por el movimiento de los electrodos y por conocimientos previos de la situación del tapón poroso y del refractario de la cuchara.



*FIGURA 1.13. FOTO DEL OJO METÁLICO EN HORNO CUCHARA ACINOX TUNAS.*

Cuando la presión de entrada a la cuchara es muy alta, puede ser causado porque ha crecido la obstrucción o la resistencia al flujo en el tapón. Cuando la presión es muy baja existe la posibilidad de que exista salidero en la línea o en la rampa. Para ambos casos se debe aumentar el flujo del gas hasta lograr una agitación que permita realizar el proceso de homogenización en el Horno Cuchara con la calidad requerida.

El efecto del insuflado de gas se regula visualmente de forma directa. Debe garantizar una correcta agitación, un correcto calentamiento, homogenización de la temperatura y de la composición química del acero.

Cuando la temperatura es mayor a 1620 °C, se procede a la desulfuración, con altas presiones de agitación para que exista una mayor superficie de contacto entre el metal y la escoria. Después que el acero se encuentre en composición química y temperatura deseada se debe mantener un flujo de agitación constante y lo más bajo posible en un tiempo mínimo de 6 minutos, con el fin de que ocurra una decantación de las inclusiones no metálicas y una buena homogenización de la temperatura y de la composición química.

El no control adecuado del proceso de homogenización puede provocar que en el momento en que debe concluir el proceso en el Horno Cuchara para que el acero líquido sea trasladado a la Instalación de Vaciado Continuo (IVC), el producto

obtenido presente varios defectos. Incluso, podría requerirse su retorno al proceso inicial por no cumplir con las especificaciones químicas y físicas de la marca de acero solicitada, después de un gasto considerable de recursos materiales y energéticos.

Esa situación indeseable provocada por un mal proceso de homogenización del acero líquido está asociada a no establecer el valor deseado en correspondencia con las características de la cuchara. Por ejemplo, no cuando no se tiene en cuenta la variación de sus dimensiones interiores, o la no homogenización de la temperatura, la variación de las características de la escoria, las tupiciones en el tapón poroso, entre otras, provocando que estén aun presentes en el acero líquido impurezas como azufre, inclusiones no metálicas, entre otras.

En la Figura 1.14 se ilustra el diagrama en bloques del sistema de control del insuflado de gas en el Horno Cuchara para el proceso de homogenización. Se puede observar que el flujo deseado es el valor introducido manualmente por el operador. También se aprecia que no se mide el efecto directo del agitado en el proceso de homogenización, sino el flujo de gas inerte que entra a la cuchara.



*Figura 1.14. Diagrama En Bloques Del Sistema De Control Del Insuflado De Gas En Horno Cuchara.*

Para el control del insuflado de gas en el Horno Cuchara del caso de estudio se utiliza un Controlador Lógico Programable (PLC) SIMATIC S5 135U de la Siemens que se ilustra en la Figura 1.15.



*Figura 1.15. Plc Simatic S5 135u De La Siemens Para El Control De Flujo De Gas En El Horno Cuchara.*

### **1.3 ESTRATEGIAS DE LOS SISTEMAS DE CONTROL DEL INSUFLADO DE GAS EN EL HORNO CUCHARA.**

Debido a la naturaleza de este proceso, es muy complejo medir directamente el efecto del insuflado de gas en el metal. Sin embargo, es imprescindible conocer

cómo se comporta el metal líquido en cuanto a su estado físico para que exista una buena homogenización y no existan afectaciones en el proceso de la acería.

Como se mencionó anteriormente, con el conocimiento de algunas variables presentes en este proceso se puede obtener datos de importancia relevante y así llegar a conclusiones del estado del proceso de la homogenización del metal líquido. Con el objetivo de profundizar en las ventajas y desventajas de los diferentes métodos de control investigados para el insuflado de gas en el Horno Cuchara y de acuerdo a las características del caso de estudio es sugerente realizar mediciones de las diferentes variables para estudiar los datos y escoger las más adecuadas.

Una vía o recurso valioso que podría resolver la problemática de no poder medir directamente el efecto del insuflado del gas, es utilizando la Inteligencia Artificial para el Control Inteligente. El mismo comprende la automatización de procesos y sistemas complejos a través de la emulación de la inteligencia biológica, con el objetivo de reemplazar a un humano en una tarea de control. Este se inspira en el cómo los sistemas biológicos resuelven problemas para aplicarlo a la solución de problemas de control.

La línea de investigación de Control Inteligente nace con la intención de aplicar al control las técnicas de Inteligencia Artificial. Debido a que hay casos en que no existe un modelo preciso del proceso y la información accesible acerca de éste es de carácter esencialmente cualitativo.

El problema de control constituye una forma típica de toma de decisiones y para este tipo de problemas la creación de la lógica borrosa (FL, del inglés *Fuzzy Logic*) por Lofti Zadeh a inicios de los 60 significó la aparición de una nueva y poderosa herramienta. Esta permite enfrentar en situaciones de incertidumbres en modelos, información, objetivos, restricciones y acciones de control [43].

La denominada FL permite tratar información imprecisa, como estatura media, temperatura baja o mucha fuerza, en términos de conjuntos borrosos o difusos. Estos conjuntos borrosos se combinan en reglas para definir acciones combinando variables de entrada por medio de grupos de reglas que producen uno o varios valores de salida.

Los sistemas basados en lógica borrosa resultan interesantes para problemas no lineales o no bien definidos, permiten modelar cualquier proceso no lineal y aprender de los datos haciendo uso de determinados algoritmos de aprendizaje. Además, permiten utilizar fácilmente el conocimiento de los expertos en un tema, gracias a la simplicidad de los cálculos necesarios (sumas y comparaciones, fundamentalmente), normalmente pueden realizarse en sistemas baratos y rápidos.

La FL se define como un dominio integrado por variables asociadas a un conjunto difuso de valores, a través de una función de pertenencia. Debido a que dichas variables se basan en percepciones estrictamente humanas, pueden carecer de la información necesaria para emplear modelos matemáticos convencionales. Estas obligan a la búsqueda de modelos alternativos, que permitan obtener valores numéricos a partir de variables lingüísticas.

Esta lógica utiliza expresiones que no son ni totalmente ciertas ni completamente falsas, es decir, conceptos que pueden tomar un valor cualquiera de veracidad dentro de un conjunto de valores que oscila entre dos extremos, la verdad absoluta y la falsedad total. Permite arribar a conclusiones a partir de supuestos inciertos.

Esta disciplina es conceptualmente fácil de entender, flexible y tolerante a la imprecisión de los datos. Se basa en el lenguaje natural y puede ser construida a partir del conocimiento de los expertos.

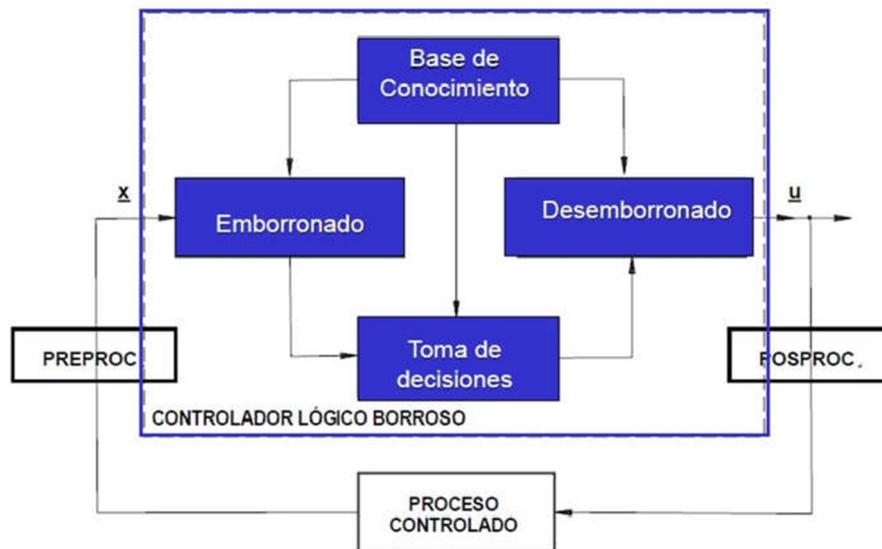
Existen numerosas ventajas con el empleo de la lógica difusa ya que no requiere identificar el sistema a controlar, ni aproximarlos, ni linealizarlos, lo cual facilita el diseño del controlador.

En la actualidad esta lógica se puede encontrar en diferentes aplicaciones como lavadoras, hornos microondas, cámaras de video, televisores, aires acondicionados, en la industria automovilística, ascensores, trenes, en la medicina, entre otros.

Para su comprensión es necesario comparar los conjuntos clásicos con los difusos. En los clásicos una variable solo puede pertenecer a una clase y en los difusos puede pertenecer a más de una, esto será definido por las funciones de pertinencia  $\mu(x)$ . Entre ellas existen diferentes tipos: Singleton, Conjunto cortado, triangular, trapezoidal, gaussiana, campana generalizada, sigmooidal y otras.

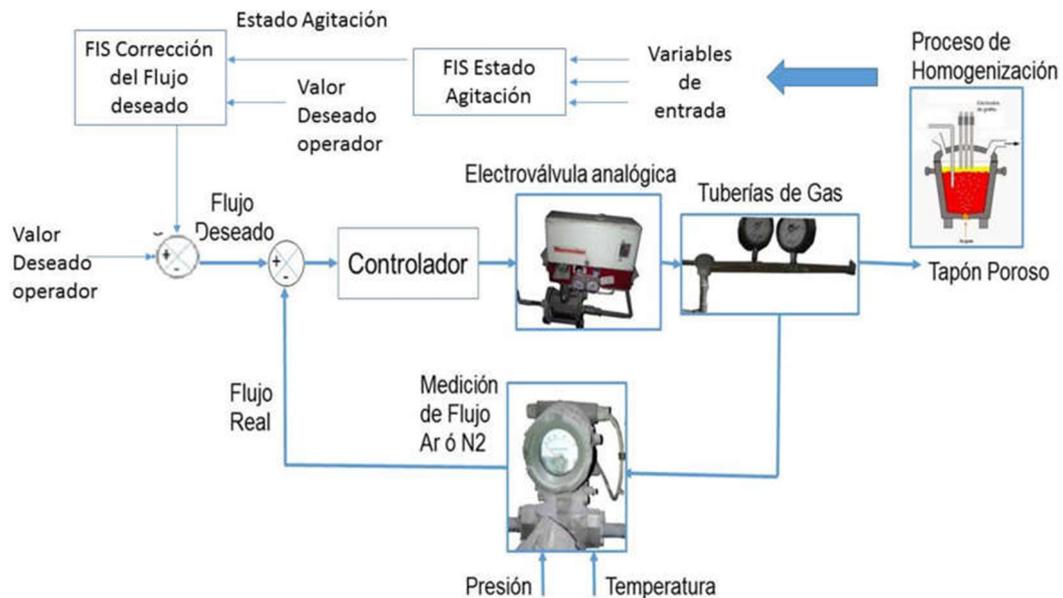
En todos los procesos, sobre todo los industriales, surge la necesidad de realizar un sistema de control capaz de rechazar las perturbaciones externas e internas y ello también es posible con un controlador borroso como el de la Figura 1.16. El mismo cuenta con:

- Bloque de pre-procesamiento, acondiciona las señales antes de introducirlas al procesador digital.
- Emborronado, transforma la información determinista en información cualitativa tomando como referencia a conjuntos borrosos, obteniendo el valor de pertenencia que tiene en cada conjunto.
- Base de conocimiento, información que posibilita el procesamiento matemático del "estado" a fin de generar las acciones de control. Base de Datos y Base de Reglas.
- Método de inferencia: Es el algoritmo que seguirá la computadora para inferir la conclusión a partir de las premisas, es decir, a partir de las señales entrantes y las reglas de control.
- Desemborronado, convierte el conjunto difuso resultante de la inferencia en una cantidad determinista para generar la señal de control.
- Post-procesamiento: Genera la señal de control.



*Figura 1.16. Estructura De Un Controlador Borroso*

En correspondencia con el marco teórico presentado en este estudio, se propone un esquema como el de la Figura 1.17 con tres sistemas de inferencia borrosos para adaptar en línea el valor deseado del lazo de control de flujo que funciona actualmente en la planta y de esta forma cumplir con la hipótesis científica que se ha planteado. Obsérvese que el valor deseado será propuesto a través de los Sistemas de Inferencia Borrosa, en correspondencia con los valores de las variables a medir.



*Figura 1.17. Esquema De Control Con Medición Directa Del Efecto De Las Perturbaciones, Realizando Una Corrección En Línea Del Valor De Referencia Del Lazo De Control De Flujo.*

## CONCLUSIONES

Luego de exponer el marco teórico realizando un análisis crítico de la bibliografía consultada, se llega a las siguientes conclusiones:

- El estudio de varios métodos de medición del estado de la homogenización del acero líquido en el Horno Cuchara, a través del insuflado de gas, permitió conocer que la utilización de las variables más adecuadas depende de las características particulares de cada instalación.
- Cuando no se mide la calidad del proceso de homogenización y el valor deseado del flujo de gas es introducido manualmente por el operador, no es

posible garantizar con técnicas tradicionales los requerimientos de este proceso con tanta incertidumbre.

- Una vía de solución para el problema que ocupa a esta investigación, puede ser utilizando un esquema que utilice un procesamiento mediante lógica borrosa para tener en cuenta las incertidumbres por los cambios de las características de los elementos del proceso y las perturbaciones.

## **Capítulo 2 DISEÑO DE UN SISTEMA BORROSO PARA AJUSTAR EL VALOR DESEADO EN EL LAZO DE CONTROL DEL INSUFLADO DE GAS EN UN HORNO CUCHARA.**

---

---

### **INTRODUCCIÓN**

Una vía muy importante para la mejora del rendimiento energético de un Horno Cuchara es la optimización del control del proceso. Dicho control resulta extremadamente problemático en este caso por la dificultad de efectuar mediciones fiables de forma continua que permitan seguir la evolución del proceso.

Evidentemente, el problema fundamental para la realización del control del proceso es no disponer de un modelo del mismo que permita predecir su comportamiento. Una representación matemática de los fenómenos físico-químicos (arco eléctrico, flujo de materiales, reacciones químicas) y otros que tienen lugar en el interior del horno se realiza planteando determinadas hipótesis y simplificaciones, esto limitaría enormemente su aplicabilidad.

Por lo tanto, en este capítulo se le dará solución a dicho problema mediante el diseño de sistemas borrosos que permitan medir el estado en que se encuentre la Agitación del acero líquido en el Horno Cuchara. Se tendrá en cuenta la elección adecuada de los sistemas y la obtención de los datos necesarios para su funcionamiento, a partir de la correcta selección de las variables medidas que representan el comportamiento dinámico de estos procesos.

### **2.1 FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE LA PROPUESTA**

A partir de los ejemplos mencionados en el Capítulo 1, se observa que existen múltiples caminos de actuar sobre el efecto directo de la homogenización, a través del insuflado de gas en el Horno Cuchara. Para la selección del sistema adecuado es necesario conocer sus ventajas y desventajas, como se muestra en la Tabla 2.1.

*Tabla 2.1. Métodos Empleados Para Detectar El Estado De La Homogenización En El Horno Cuchara.*

<b>Criterio</b>	<b>Sensor de Vibración</b>	<b>Sensor con cámara.</b>	<b>Modelos físicos matemáticos</b>
Confiabilidad	Se afecta por vibraciones externas.	El ojo no ocurre en algunos momentos del proceso.	Depende de la calidad de la medición de las variables
Procesamiento de señales	Transductor de vibro-señales	Tratamiento de imágenes	Procesamiento a través de programas computacionales
Montaje e instalación	Se instala en la parte externa de la cuchara	Debe tener visión directa sobre el acero líquido	La mayoría de las señales ya son medidas en el proceso
Costos	Bajo	Alto	Medio
Mantenimiento	Poco frecuente	Frecuente	Normalmente según programación

Luego de realizar estudios comparativos sobre las posibles variables que reflejan de manera directa las perturbaciones en el proceso de homogenización del acero en el Horno Cuchara y con el análisis de la Tabla 2.1, se arribó a la conclusión de utilizar un Sistema de Inferencia Borroso para el caso objeto de estudio. El sistema a utilizar debe ser capaz de expresar el estado de la agitación del acero líquido con el insuflado de gas, acción fundamental en el proceso de homogenización.

## **2.2 DISEÑO DE EXPERIMENTOS.**

### **2.2.1 DETERMINACIÓN DEL ESTADO DE LA AGITACIÓN DEL ACERO LÍQUIDO EN EL HORNO CUCHARA CON EL INSUFLADO DE GAS A PARTIR DE LA MEDICIÓN DE DIFERENTES VARIABLES.**

Luego de un profundo estudio bibliográfico se arriba a la necesidad de realizar experimentos para conocer el estado de la agitación del metal en el proceso de homogenización en el Horno Cuchara. Los experimentos tienen el objetivo de aportar información sobre la relación entre las diferentes variables y la calidad de la homogenización.

## *Capítulo2. Diseño de un sistema borroso para ajustar el valor deseado en el control.*

---

Si se comprueba que a diferentes valores de las variables medidas se modifica el diámetro del ojo metálico, se puede predecir el diámetro del ojo metálico y así conocer el estado de la homogenización.

Para el diseño del experimento se proponen variables para actuar, medir y observar atendiendo a los estudios realizados:

- Variables dependientes: Estado de la Agitación, diámetro del ojo metálico
- Variable independiente activa o manipulada: Flujo del gas inerte insuflado
- Variables independientes perturbadoras: Nivel de Escoria, temperatura del acero, nivel del acero, diferencia de presión del gas en la rampa, número de coladas del tapón poroso, número de coladas de la cazuela.

También se realizó una evaluación de riesgos:

Quemaduras por exposición al calor, salpicaduras o contacto, golpes mecánicos y caída de altura.

Los materiales y personal calificado son los siguientes:

Se requieren 15 tubos de tres metros de largo doblados a 90 ° y de espesor delgado, un analizador de redes, una cinta métrica, cámara fotográfica, cascos protectores, traje de protección a altas temperaturas, guantes para protección mecánica y altas temperaturas, operador con experiencia en Horno Cuchara, tecnólogo del área y especialista eléctrico de mantenimiento.

El plan general considera:

- 1- Tomar Temperatura del acero;
- 2- Medir Nivel del acero;
- 4- Medir Nivel de la escoria;
- 5- Conocer el valor del flujo de gas;
- 6- Medir los parámetros eléctricos durante la operación del Horno Cuchara, con un analizador de redes;
- 7- Observar el diámetro del ojo metálico;
- 8- Preguntar al operador sobre el estado de la agitación.

## Capítulo 2. Diseño de un sistema borroso para ajustar el valor deseado en el control.

Los experimentos deben realizarse en tres escenarios:

- I. Llegada de la cazuela con el acero líquido desde el HAE
- II. Luego de adicionar ferroaleaciones y ajustar la escoria
- III. Final del afino antes de enviar a la máquina de vaciado

Hacer lo mismo variando el flujo de gas, a diferentes temperaturas y a diferentes alturas de acero y de escoria. Existen un conjunto de variables que se miden en el proceso y sus valores son almacenados en el software SCADA. En la Figura 2.1 se ilustra una pantalla del mismo que incluye alguna de estas variables.



Figura 2.1. Panel De Supervisión Y Control Del Proceso De Insuflado De Gas.

En el SCADA se almacenan registros históricos de los valores de temperatura, valores deseado y real del flujo de gas, de la presión de entrada y de la de salida de la rampa de control, entre otros.

Para tener el valor del espesor de la capa de escoria se preparó un tubo de metal doblado, para introducirlo en el metal líquido. El mismo se introduce por al menos 15 s hasta que sea fundido debido a la temperatura del acero líquido. En el tubo quedará la marca del nivel de la escoria porque la misma se adhiere a este. En la Figura 2.2, se ilustran un tubo antes y después de la medición. En el ejemplo ilustrado, el tubo se introdujo un tiempo inferior a 15 s, para evitar su fusión. Por ello,

puede notarse que desde el codo de 90 ° hasta donde inicia el color rojo intenso se tiene una medida de la distancia entre el borde libre de la cuchara y el nivel de metal líquido. También, se puede medir la altura de la escoria por la zona roja opaca.



*Figura 2.2. Tubo Preparado Para Medir El Espesor De Escoria.*

En cada colada que se estudió se tomaron datos de tiempo real de las diferentes variables. Además, con una frecuencia aproximada de 60 s se consultaba el criterio de expertos sobre el tamaño del ojo metálico y sobre la calidad de la homogenización. Durante el proceso se apreció que en el proceso de esta planta el ojo metálico no siempre es visible, dependiendo de varios factores como las características de la escoria y el estado del tapón poroso. A continuación, la Figura 2.3 muestra uno de los momentos en que fue visible.



*Figura 2.3. Foto Del Ojo Metálico En Horno Cuchara De Acinox Tunas*

## *Capítulo 2. Diseño de un sistema borroso para ajustar el valor deseado en el control.*

El criterio de expertos se fue tomando varias veces durante la colada en tiempo real, para tener suficiente número de muestras que permitiera el análisis del comportamiento dinámico del proceso de homogenización. El Diámetro del ojo y el estado de la Agitación se valoraron cualitativamente de la siguiente forma:

*Tabla 2.2 Clasificación Cualitativa De Los Expertos Respecto Al Ojo Metálico Y La Agitación Del Baño Metálico*

<b>Diámetro del ojo Met.</b>	<b>Muy Grande</b>	<b>Grande</b>	<b>Mediano</b>	<b>Pequeño</b>	<b>Muy Pequeño</b>
Agitación	Muy Alta	Alta	Buena	Regular	Mala

En las entrevistas realizadas se identificó que los expertos determinan la calidad de la homogenización considerando el sonido en el Horno Cuchara (HC) durante el proceso de calentamiento por arco eléctrico. Además, observando la superficie de la cazuela para evaluar al ojo metálico y evaluando la diferencia entre las corrientes de fase mostradas en el panel de la Figura 2.1. El experto, utilizando su experiencia, aportó la información clasificando lo observado cada un minuto y con los criterios sugeridos en la Tabla 2.2.

A continuación, en la Tabla 2.3, un resumen de las coladas en las que se obtuvieron las muestras de datos. Estos incluyeron otras informaciones de interés como número de la cazuela, cantidad de coladas desde que se cambió las paredes de refractario, así como número de coladas que se ha utilizado el tapón poroso.

*Tabla 2.3 Coladas Objetos De Estudio En El Horno Cuchara Acinox Las Tunas.*

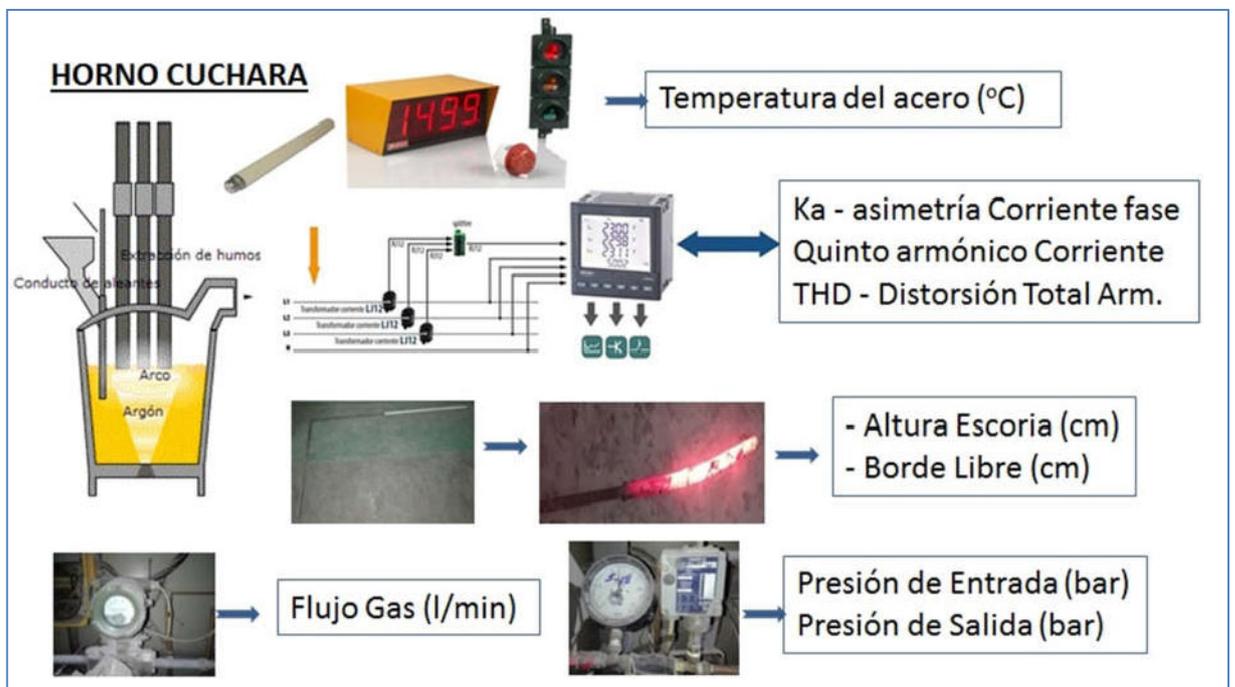
<b>Colada</b>	<b>Fecha</b>	<b>No de cazuela</b>	<b>No de Coladas Tapón</b>	<b>No de Coladas Cazuela</b>
13934	20/05/2021	9	6	8
13938	21/05/2021	9	2	11
13939	21/05/2021	9	4	12
13942	22/05/2021	9	1	15
13963	25/05/2021	7	3	10
13964	25/05/2021	9	2	26
13965	26/05/2021	7	4	11
13967	26/05/2021	7	0	12
13968	26/05/2021	9	0	28
13969	26/05/2021	7	1	13

*Capítulo 2. Diseño de un sistema borroso para ajustar el valor deseado en el control.*

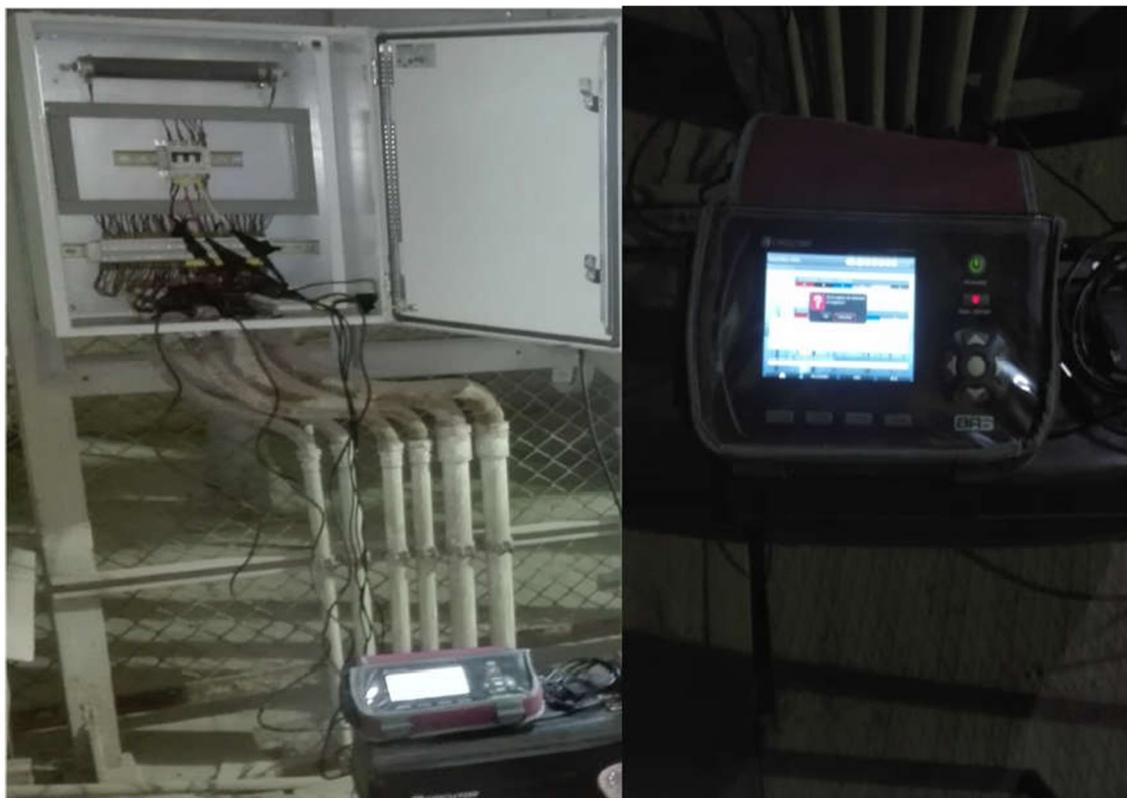
La medición de la altura de la escoria con el método explicado anteriormente es efectiva, pero sería muy difícil realizarla en línea con el proceso de manera permanente. Por ello, también surge la necesidad de proponer la altura de la escoria a partir de la medición de variables eléctricas considerando estudios anteriores [44] y [45].

Para la medición de las variables, incluyendo los parámetros eléctricos de calidad de energía en el Horno Cuchara, se diseñó una estación experimental como la que se muestra en la Figura 2.4. Un analizador de redes de la serie AR6 fue instalado, es un instrumento programable que mide, calcula y registra en memoria los principales parámetros eléctricos en redes industriales. El mismo fue instalado en el desconectivo del secundario del transformador del Horno Cuchara, Figura 2.5.

Con el objetivo de medir la corriente y la tensión en las fases 1,2,3 a la salida del transformador del HC, se utilizaron tres pinzas del tipo CP-5 de CIRCUITOR. Las mismas fueron colocadas a la salida de los transformadores de corriente T004, T005 y T006 con relación de transformación de 1000/5 A.



*Figura 2.4. Estación Experimental En Horno Cuchara Acinox Tunas.*



*Figura 2.5. Analizador De Redes, Conectado En El Horno Cuchara De Acinox Tunas.*

A partir de las mediciones de tensión y corriente por fase el analizador de redes, realiza un procesamiento interno mediante el cual se obtienen otros parámetros eléctricos relacionados con la calidad de la energía, obteniendo entre otros: factor de potencia, potencia activa, potencia reactiva inductiva y capacitiva de las tres fases, las distorsiones armónicas totales de tensión y corriente, armónicos de corriente y tensión hasta el orden 30, los desbalances de tensión y corriente, así como la asimetría de las corrientes de fases, entre otros. La altura de la escoria se midió con el método manual antes explicado y que aquí se ilustra en la Figura 2.6. Los datos tomados para las coladas indicadas en la Tabla 2.3 consideraron los mismos intervalos de tiempo de muestreo durante cada proceso de fusión.

En este caso, los experimentos realizados tenían como objetivo lograr conocer la posible relación entre parámetros eléctricos vinculados con el funcionamiento del Horno Cuchara y la altura de la escoria.



*Figura 2.6. Medición De La Escoria En El Horno Cuchara De Acinox Tunas.*

**2.2.2 RECOLECCIÓN DE LOS DATOS EXPERIMENTALES**

Como se mencionó, es necesario recolectar los datos de las variables independientes ya seleccionadas, para este fin se confeccionó la siguiente tabla:

*Tabla 2.4 Recolección De Datos Variables Independientes.*

Colada	No. Cazuela	Col.No. Tapón	Col. Escoria	h (cm)	H (cm) Acero	Temp. Acero	Flujo del Gas	del	Diámet. del Ojo	Agitación

Para la recolección y análisis de los datos eléctricos que serán utilizados en la medición de la escoria se utilizó la Tabla 2.5. Los mismos fueron obtenidos con el analizador de redes que se muestra en la Figura 2.5 y procesados posteriormente en una computadora.

*Tabla 2.5. Recolección De Parámetros Eléctricos*

Parámetros Eléctricos/tiempo(seg)	1	2	3					
Desbalance de las corrientes de fase								
Índice total de distorsión de armónico								
Corriente del Quinto armónico								

Para recoger los datos referentes al tamaño del ojo metálico, se utilizó la Tabla 2.6. En la misma los expertos aportaron su valoración cualitativa, basándose en su experiencia y los parámetros referidos anteriormente (ruido, color, lecturas en el SCADA, dureza al introducir las lanzas).

La cualificación se emitió cada un minuto considerándose este tiempo suficiente para representar el comportamiento dinámico de esta variable que según lo observado y lo expuesto en [46], no presenta cambios significativos en tiempos inferiores.

*Tabla 2.6. Tamaño Del Ojo Metálico Según Expertos*

<b>Colada</b> No.: _____	<b>Hora en que comienza:</b> _____																
	<b>Hora en que finaliza:</b> _____																
<b>Diámetro del ojo Met.</b>	<b>Evaluación emitida cada ____ minuto</b>																
<b>Muy Grande</b>																	
<b>Grande</b>																	
<b>Mediano</b>																	
<b>Pequeño</b>																	
<b>Muy Pequeño</b>																	

Durante los experimentos se comprobó que no siempre el ojo metálico fue visible, debido a que en la planta caso de estudio la cantidad y la calidad de la escoria es un impedimento para la formación del mismo. Por ello se decidió evaluar que los expertos opinaran sobre el estado o calidad de la agitación, como se observa en la Tabla 2.7.

*Tabla 2.7. Estado De La Agitación Según Expertos*

<b>Colada</b>	Hora en que comienza: _____				
<b>No.: _____</b>	Hora en que finaliza: _____				
<b>Muy alta</b>					
<b>Alta</b>					
<b>Buena</b>					
<b>Regular</b>					
<b>Mala</b>					

Al analizar las características de las variables que intervienen en el proceso, considerando su influencia y significado físico, así como la necesidad de reducir la dimensionalidad de los posibles sistemas borrosos, entonces se agruparon y se crearon otras variables de entrada.

Por ejemplo, el índice de flujo efectivo (IFE), la cual se representa por la fórmula:

$$JFE = \frac{\text{Flujo real}}{\text{Flujo Max}} * \frac{\Delta}{\Delta \text{ max}} * 100 \quad (2.1)$$

esta variable se creó debido a que los gases son comprimibles y el flujo efectivo que incide en la homogenización cambia sustancialmente cuando la presión o el flujo real cambian. Esto se evidencia de manera significativa cuando el uso o estado del tapón crece y cambia la diferencia de presión en la entrada de la cuchara.

Otra variables es el Coeficiente de Resistencia dado por la fórmula:

$$\text{Coe[DR} = \frac{\text{Altura/Alt max}}{\Delta\text{Temp}/\Delta\text{Temp max}} * 100 \quad (2.2)$$

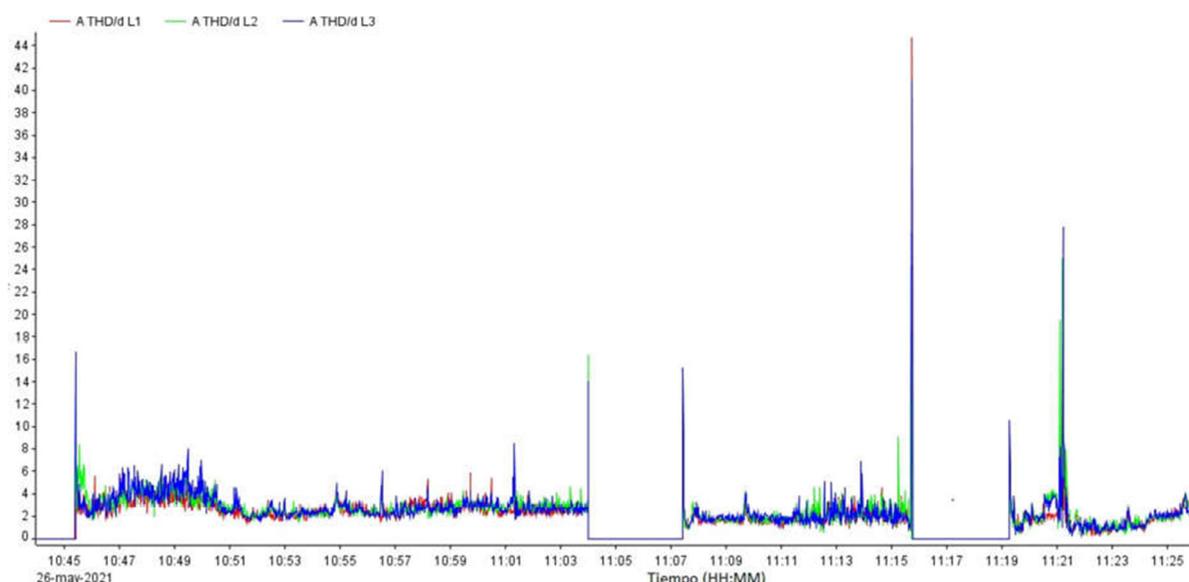
el CoefDR es una cantidad adimensional que se usa para cuantificar la resistencia que le aplica el acero líquido al gas insuflado en la cazuela, un CoefDR bajo indica que el gas tendrá menos resistencia al paso a través del tapón poroso, estos valores son tomados en tiempo real del SCADA. El mismo depende de la columna de acero líquido y de la Temperatura que según su valor, cambia notablemente la viscosidad del acero líquido.

Para la obtención de la base de datos creada por el analizador de redes, se utiliza la herramienta PowerVision Plus 1.3. El mismo es un software diseñado como una aplicación para trabajar con analizadores de redes y dispositivos de medida de Circutor. El mismo permite leer los datos históricos almacenados de dichos

dispositivos, visualizarlos y exportarlos en formato .csv, el cual es compatible con el programa Microsoft Excel.

La variable altura de la escoria es medida con ayuda de la herramienta diseñada, ver Figura 2.2, como ya se mencionó. El valor obtenido durante las mediciones en la planta es sincronizado con los datos obtenidos por el analizador de redes.

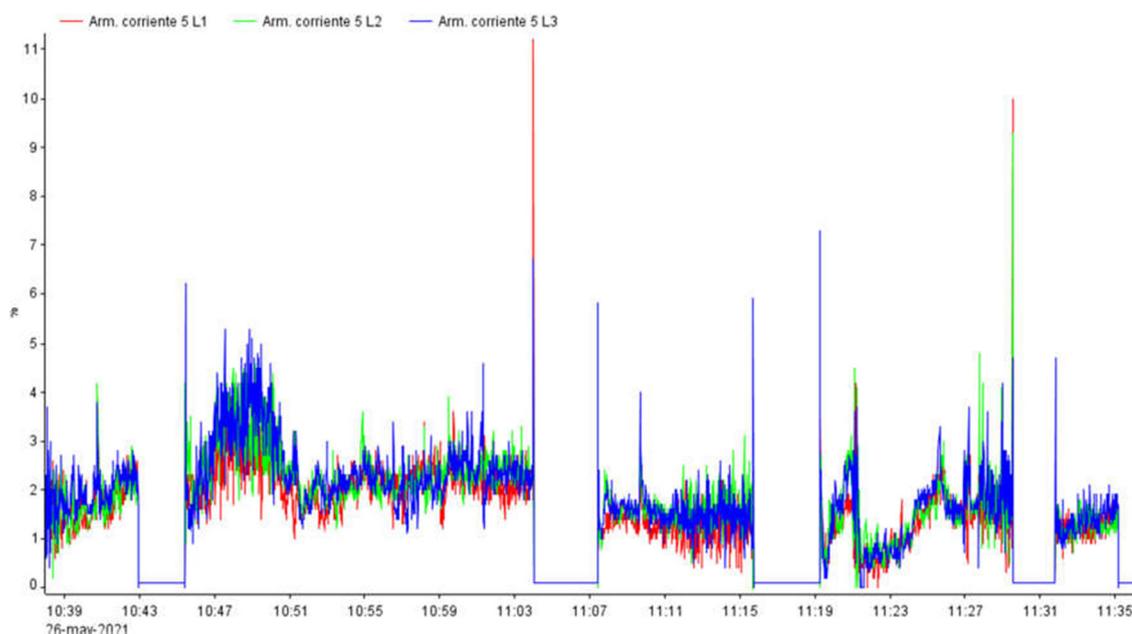
Con el objetivo de encontrar los parámetros eléctricos que tienen una correlación aceptable con la altura de escoria, se evaluó cuidadosamente la correlación entre todos los parámetros medidos y la altura de la escoria medida. Para esto se tomó en cuenta también lo planteado en [46], [47], [48]. En esos trabajos es utilizada la distorsión total de armónicos (THD, del inglés Total Armonic Distortion) como variable para evaluar el comportamiento de la escoria. La misma fue medida por el analizador de redes, obteniendo una buena correlación entre su comportamiento y el proceso, como se puede apreciar en la Figura 2.7.



*Figura 2.7 Comportamiento De La Variable Thd*

Con el analizador de redes se midieron también los armónicos pares e impares hasta el orden quince. Después de procesar los datos obtenidos de los armónicos de corriente y tensión generados en el HC durante una colada, se determinó que lo más representativos del proceso fueron los armónicos impares de orden menor que siete. Los armónicos de tensión al igual que los armónicos de corriente de orden mayor

que siete presentan valores pequeños (0-2 %). La mejor correlación se obtuvo con el armónico de corriente de orden cinco como se puede apreciar en Figura 2.8.



*Figura 2.8 Comportamiento De La Variable Promedio Del Quinto Armónico De Corriente*

La última variable eléctrica escogida para evaluar el comportamiento de la escoria es la asimetría de las corrientes de fase (Ka) utilizada en el artículo [46] y la cual presenta una buena correlación con el comportamiento de la escoria.

Los datos de las tres variables seleccionadas: THD, quinto armónico de corriente y Ka fueron exportados al Excel utilizando la herramienta Power Vision Plus, quedando registrados como en el ejemplo de la, Tabla 2.8 En el caso de las dos primeras variables seleccionadas se obtiene su valor para las tres fases de entrada.

*Tabla 2.8 Datos De La Colada 13939*

Colada	Hora	Arm. corriente 5 L1 (%)	Arm. corriente 5 L2 (%)	Arm. corriente 5 L3 (%)	THD/d L1 (%)	THD/d L2 (%)	THD/d L3 (%)	Ka A III
13939	14:07	0,1	0,1	0,1	0	0	0	0
13939	14:08	0,1	0,1	0,1	0	0	0	0
13939	14:10	0,97	1,22	1,36	13,5	3,7	2,3	25,498
13939	14:11	1,35	1,84	1,97	2,2	2,7	2,8	0,255
13939	14:12	1,65	2,19	1,87	3,1	3,9	3	0,252
13939	14:13	1,52	2,1	1,84	2,8	3,8	3	0,262

*Capítulo2. Diseño de un sistema borroso para ajustar el valor deseado en el control.*

13939	14:14	1,89	1,75	1,85	3,1	2,7	3	0,25
13939	14:15	1,07	1,23	1,11	1,7	1,9	1,6	0,223
13939	14:16	1,59	1,79	1,84	2,6	2,7	2,9	0,198
13939	14:17	1,67	1,92	1,88	2,4	2,8	2,4	0,218
13939	14:18	0,1	0,1	0,1	0	0	0	0
13939	14:19	1,5	1,2	1,28	2,8	2,4	2,6	0,802
13939	14:20	0,85	0,69	0,76	1,4	1,8	2,3	0,702
13939	14:21	1,2	1,71	1,74	2,6	2,8	2,8	0,193
13939	14:22	1,29	1,66	1,52	2,2	2,6	2	0,215
13939	14:23	1,86	2,05	1,78	2,9	3,1	2,5	0,222
13939	14:24	1,73	2,04	1,5	2,6	3,4	2,3	0,21
13939	14:25	0,89	1,08	1,04	1,5	2,1	1,7	0,225
13939	14:26	0,96	1,19	0,92	1,4	2,1	1,4	0,207
13939	14:27	1,38	1,7	1,5	1,9	2,2	1,7	0,212
13939	14:28	2,07	2,22	2,32	2,5	2,6	2,5	0,177

Luego se procesaron los datos obtenidos como se muestra en la Tabla 2.9, calculando el promedio para las variables THD y quinto armónico de corriente quedando organizados por columnas con los nombres siguientes: Fecha/Hora, Ka, promedio de quinto armónico en las tres fases, promedio de THD en las tres fases, IFE, coeficiente de resistencia y altura de la escoria.

*Tabla 2.9 Datos Procesados.*

Colada	Hora	Promedio Arm. corriente 5	Promedio THD	Ka A III	IFE	Coef de resistencia	Altura de la escoria
13939	14:10:00	0,316117542	0,1730257	1	0,203615938	0,79	29,17
13939	14:11:00	0,45948	0,06832	0,01	0,2493	0,76	29,25
13939	14:12:00	0,50846	0,08873	0,0099	0,2809	0,74	29,34
13939	14:13:00	0,48620	0,08518	0,0103	0,2647	0,72	29,42
13939	14:14:00	0,48887	0,07808	0,0098	0,3450	0,70	29,51
13939	14:15:00	0,30365	0,04614	0,0087	0,2928	0,68	29,59
13939	14:16:00	0,46483	0,07276	0,0078	0,3131	0,66	29,68
13939	14:17:00	0,48709	0,06744	0,0085	0,3908	0,64	29,76
13939	14:18:00	0,02671	0,00000	0	0,3377	0,62	29,85
13939	14:19:00	0,35441	0,06921	0,0315	0,3464	0,61	29,93
13939	14:20:00	0,20481	0,04880	0,0275	0,3464	0,59	30,01
13939	14:21:00	0,41407	0,07276	0,0076	0,3464	0,58	30,10
13939	14:22:00	0,39804	0,06034	0,0084	0,2668	0,56	30,18
13939	14:23:00	0,50668	0,07542	0,0087	0,2879	0,55	30,27
13939	14:24:00	0,46928	0,07365	0,0082	0,2879	0,54	30,35
13939	14:25:00	0,26803	0,04703	0,0088	0,2879	0,52	30,44

**Capítulo 2. Diseño de un sistema borroso para ajustar el valor deseado en el control.**

13939	14:26:00	0,27337	0,04348	0,0081	0,2879	0,51	30,52
13939	14:27:00	0,40784	0,05146	0,0083	0,2879	0,50	30,61
13939	14:28:00	0,58860	0,06744	0,0069	0,28787432	0,49	30,69

Cumpliendo con lo planteado en [49] se realizó el escalado de los datos para evitar saturación en las funciones de activación de las neuronas que componen las capas ocultas y de salida de la RNA (Red Neuronal Artificial), Para ello, se buscaron los valores máximos y mínimos de cada variable empleada y se decidió realizar el escalado de  $K_a$  en el intervalo  $[0, 1]$  mediante la siguiente ecuación:.

$$K_{a_{Norm}} = \frac{K_a}{Coef_{Norm}} \quad (2.3)$$

en la que  $K_{a_{Norm}}$  es el valor resultante de la normalización y  $Coef_{Norm}$  es el coeficiente de normalización que en este caso fue igual a 25.498 unidades. En el caso del promedio del quinto armónico de corriente se realizó un escalado en el intervalo de  $[0, 1]$ , a través de la expresión:

$$\text{Promedio del quinto armónico de corriente}_{Norm} = \frac{\text{Promedio del quinto armónico de corriente}}{Coef_{Norm}}, \quad (2.4)$$

en la que  $\text{Promedio del quinto armónico de corriente}_{Norm}$  es el valor del promedio del quinto armónico de corriente normalizado, con un  $Coef_{Norm} = 3.743$  unidades que fue el valor máximo de promedio del quinto armónico de corriente.

Para el caso de la variable Promedio de THD se procedió de igual manera, realizando un escalado en el intervalo de  $[0, 1]$ , a través de la expresión (2.5). Siendo el  $\text{Promedio del quinto armónico de corriente}_{Norm}$  el valor del Promedio de THD normalizado, con un  $Coef_{Norm} = 37.566$ :

$$\text{Promedio de THD}_{Norm} = \frac{\text{Promedio de THO}}{Coef_{Norm}} \quad (2.5)$$

Para la variable IFE se realizó la misma tarea, escalando en el intervalo  $[0,1]$  a través de la expresión 2.6, con un  $Coef_{Norm} = 32.867$ :

$$IFE_{Norm} = \frac{IFE}{Coef_{Norm}} \quad (2.6)$$

De igual manera, se procedió con la última variable CR, con un  $Coef_{Norm} = 4.69$ :

$$CR_{Norm} = \frac{CR}{Coef_{Norm}} \quad (2.7)$$

### **2.3 ESQUEMA PROPUESTO CON LÓGICA BORROSA PARA AJUSTAR EL VALOR DESEADO DEL CONTROL DEL INSUFLADO DE GAS EN EL HORNO CUCHARA.**

Actualmente, los operadores ajustan el valor deseado del sistema de control escuchando el sonido del Horno Cuchara y el movimiento de los electrodos cuando se está fundiendo. Además, observan el ojo metálico cuando la escoria lo permite, el valor de presión en la entrada y en la salida de la rampa de insuflado de gas, para el proceso de homogenización del acero en el Horno Cuchara.

Los modelos borrosos que se proponen son del tipo Takagi-Sugeno (TS) introducidos en 1985 [50], 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, de tipo:

$$\text{Si } x \text{ es } A_i \text{ Entonces } y_i = f_i(x)$$

$$\text{donde } y_i = f_i(x) = a_i^T x + b_i$$

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.

Cuando los consecuentes de este modelo son funciones de orden cero, es decir son constantes, resulta similar al modelo Mamdani. Una de las ventajas que presenta este tipo de modelos, es la mayor facilidad para la estimación de los parámetros. Así mismo, la obtención de las funciones de pertenencia resulta menos compleja debido a que estos modelos describen regiones borrosas donde las salidas del sistema dependen de las entradas de forma lineal. Por tanto, los parámetros de los consecuentes pueden ser definidos sin gran dificultad o calculados con el uso de métodos estándar. En el caso de estudio es factible proponer los consecuentes a partir del análisis de los datos y los criterios de expertos.

En este trabajo se proponen tres Sistemas de Inferencia Borrosos (FIS, del inglés *Fuzzy Inference System*) del tipo Takagi-Sugeno: uno estima el valor de la altura de la escoria a partir de un sistema neuro-borroso (SND), otro provee el estado de la agitación, a través de la variable "Estado Agitación" y el último y más importante

propone el ajuste del valor deseado del flujo a la entrada de la rampa de control del insuflado de gas. Estos pueden posibilitar una mejor compensación de las perturbaciones e incertidumbre presentes en el proceso para lograr una buena homogenización de la mezcla del acero líquido. El estudio de caso permitió conocer que la forma tradicional que se ha utilizado provoca eventos de mucha agitación con efectos de enfriamiento, derrame de acero líquido, averías en el tapón poroso y otros eventos de poca agitación afectando la calidad del acero y la eficiencia del proceso.

### **2.3.1 MODELADO DEL SISTEMA DIFUSO ALTURA DE LA ESCORIA**

Tomando en cuenta los resultados positivos que se lograron en [44] y [45] para estimar la altura de la escoria en un proceso similar, en este trabajo se diseñó un Sistema de Inferencia Neuro Difuso Adaptativo (ANFIS) para predecir la altura de la escoria en el Horno Cuchara de ACINOX Las Tunas. En este estudio, similar a [44] y [45], se utilizó la medición de cinco variables de entrada, de ellas, tres variables eléctricas y dos variables del proceso.

Para la selección adecuada de las variables de entrada también se consideró la dimensionalidad del FIS, porque es recomendable tener la menor cantidad de variables siempre y cuando las seleccionadas sean suficientes para representar en detalles el comportamiento del sistema.

El analizador de calidad de energía ha registrado tres parámetros eléctricos en un intervalo de tiempo, a = Índice total de distorsión de armónicos; b = 5to armónico de corriente; c = Asimetría de las corrientes de fase.

De las dos variables creadas a partir del análisis del comportamiento del proceso, una es creada a partir del flujo y la diferencia de presión, d= Índice de Flujo Efectivo (IFE), la otra a partir de la temperatura y el nivel del acero líquido, e = Coeficiente de Resistencia del acero (CoefDR) y así quedan definidas las entradas para el entrenamiento del ANFIS:

La altura de la escoria que se ha determinado en el mismo intervalo de tiempo y fecha, q = Altura de la escoria. Atendiendo a lo anterior se tiene el par de entradas y una salida necesarios para el entrenamiento, quedando como sigue:

$$\text{Entradas} = [a, b, c, d, e], \text{ Salida} = [q] \quad (2.8)$$

Para la elección del modelo se tuvieron en cuenta las necesidades del sistema, como adaptabilidad, claridad en cuanto al conocimiento adquirido, eficiencia ante no linealidades, paralelismo y otros aspectos expuestos en [46]. Seleccionando como mejor opción el SND de tipo híbrido que cuenta con varios modelos aplicables a diversos campos, de estos se seleccionó el Sistema de Inferencia Neuro Difuso Adaptativo (ANFIS) como el método para predecir la altura de la escoria. El mismo cuenta con una excelente estimación de una función o un sistema con incertidumbre y no necesita conocimiento sobre la relación analítica entre la salida y la entrada. Se trata principalmente de un sistema difuso Takagi y Sugeno [50].

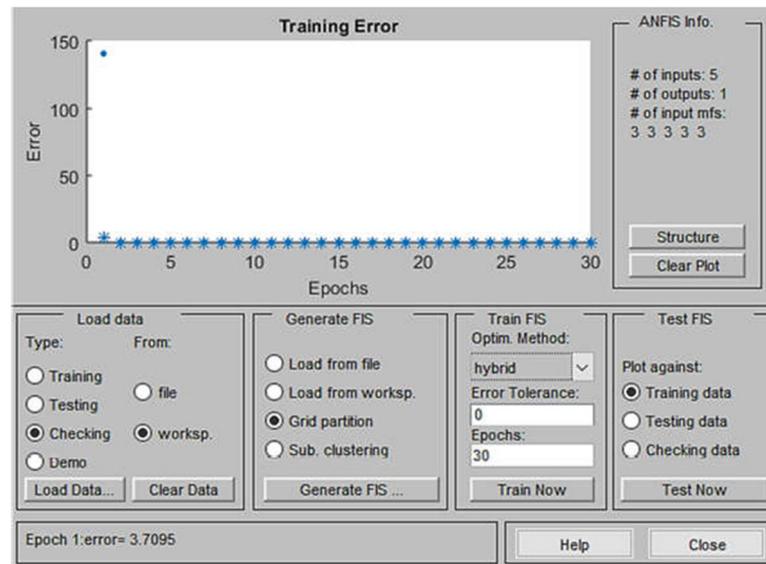
Para dar continuación al proceso de diseño del SND, se pasó a realizar el procesamiento de los datos correspondientes a las variables seleccionadas para la realización del entrenamiento del modelo ANFIS. También, se garantizó que los grupos de entrenamiento y prueba fueran representativos del comportamiento de la escoria, para la validación cruzada que realiza el toolbox ANFIS y que se recomienda en [49].

El conjunto de datos quedó conformado por los datos de 10 coladas de las variables de entrada: promedio del índice THD, promedio de quinto armónico de corriente Ka, coeficiente de resistencia (CoefDR), IFE y la altura de la escoria. Otro aspecto importante en este paso es la cantidad de datos que se asigna a cada grupo, para lo cual se decidió adoptar la definición dada en [49] de tomar el 50 % del total de datos para entrenamiento, el 25 % para prueba y 25 % restante para chequeo.

Una vez procesados los datos se procedió a realizar el entrenamiento del ANFIS. Para el entrenamiento se utilizó el *toolbox* de Matlab® **ANFIS Editor**, el cual se invoca mediante el código *anfisedit* apareciendo de esta forma una ventana como la de la Figura 2.9.

En la misma se insertan todos los datos necesarios para realizar el entrenamiento y obtener un FIS, en ella se pueden apreciar diferentes secciones. En la sección *Load data* se cargan o borran los datos de los grupos de entrenamiento, prueba y chequeo que pueden estar en un archivo .dat localizado en una dirección de la computadora personal. También se pueden importar en formato .csv desde el espacio de trabajo de Matlab®, *Generate FIS* permite generar un FIS o cargar uno previamente

diseñado. Otra de estas secciones es el *Train FIS*, en la que se especifica que método de optimización se empleará, el error de entrenamiento permisible y el número de épocas. En esta última se localiza el botón para iniciar o detener el entrenamiento. En la sección *Test FIS* se grafican los datos de los tres grupos junto a la salida del FIS, ante las entradas que componen dichos grupos. La sección *ANFIS Info* permite observar las características del ANFIS diseñado.



*Figura 2.9 Ventana Del Toolbox Anfis De Matlab*

La herramienta ANFIS cuenta con dos métodos de optimización que son: retropropagación (en inglés *backpropagation*) e híbrido (en inglés *hybrid*). Para la selección del más adecuado se realizaron dos experimentos, los cuales consistieron en entrenar el SND con ambos métodos para 10, 20 y 30 épocas de entrenamiento. Luego se hizo un ajuste de sus parámetros de acuerdo al escalado realizado y finalmente, se compararon los errores de entrenamiento, prueba y validación.

Como resultado de estos experimentos, se obtuvo que el método de optimización híbrido es el más adecuado. Este permitió lograr el menor error en todos los casos, como se muestra en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

*Tabla 2.10 Comparación Entre Los Métodos De Optimización*

Método de optimización	Número de épocas	Error de entrenamiento	Error de prueba	Error de validación
Retropropagación	10	27.5169	28.1109	29.8867
Híbrido	10	4.7586	29.6098	26.1149
Retropropagación	20	27.1054	29.3621	30.1063
Híbrido	20	4.6576	26.6089	21.1149
Retropropagación	30	27.0576	29.0284	30.1845
Híbrido	30	4.5838	16.812	21.919

En la Tabla 2.10 queda demostrado de forma práctica que para este tipo de aplicación el método de optimización más adecuado y eficiente es el híbrido. El mismo comprende dos métodos de optimización, *backpropagation* y mínimos cuadrados encargados de realizar el ajuste de las funciones de pertenencia y los valores finales de los consecuentes, respectivamente [51].

Después de haber elegido el método de optimización para el entrenamiento, se pasó a escoger el número de épocas para la cual se obtiene el error de generalización mínimo, teniendo en cuenta la evolución del error de aprendizaje y el error de test en función del número de épocas [52]. Para la implementación de lo expuesto anteriormente, se realizó un entrenamiento para 30 épocas con los grupos de datos seleccionados.

Luego de treinta minutos de entrenamiento en Matlab® R2015a con una computadora con las siguientes características: Intel Core i5-8250U a 1.80GHz, 8 GB de RAM DDR4 y un HDD de 1000 GB con una velocidad de transferencia de 2 GB/s, se arrojó como resultado que el error de entrenamiento después de la iteración número 20 se comportaba aproximadamente constante, lo cual indica que el entrenamiento realizado para las últimas 10 épocas no tiene ningún efecto positivo para el sistema Figura 2.10. Por tanto, se decidió elegir como cantidad de épocas para el entrenamiento 20 ya que con este número se logra el menor error en menor tiempo de entrenamiento.

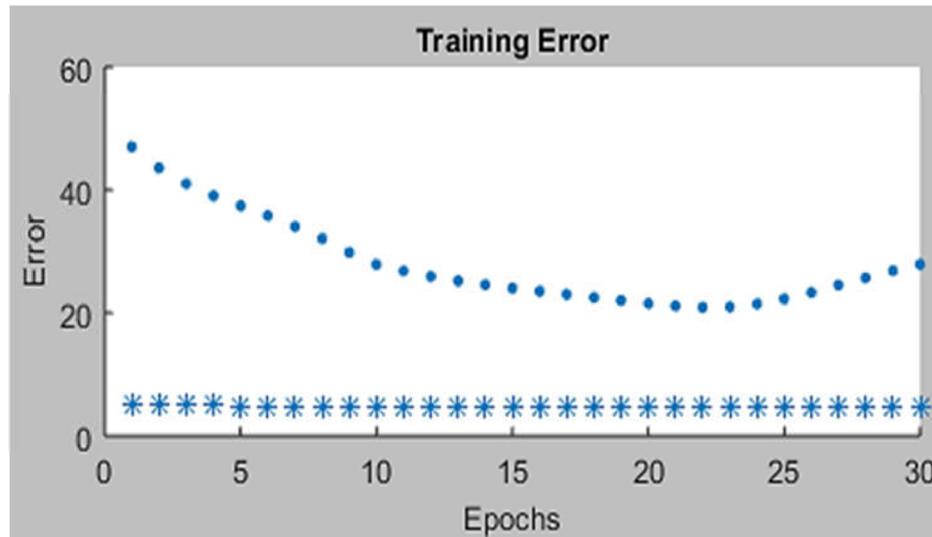
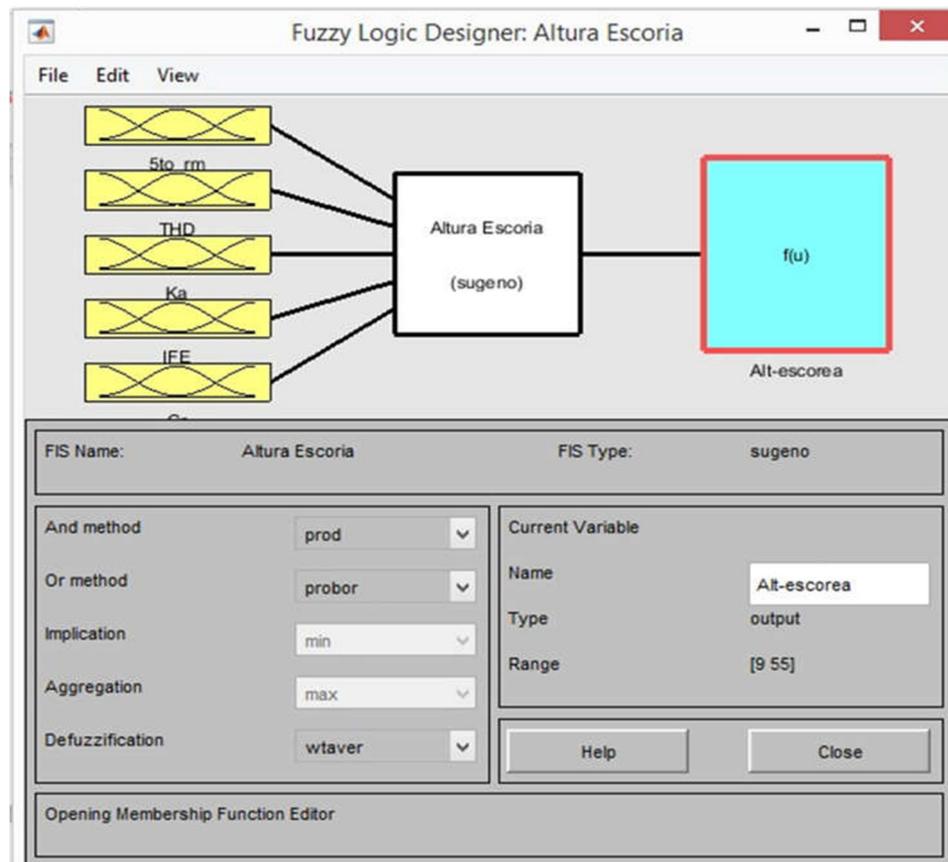


Figura 2.10. Error De Entrenamiento Del Anfis

Una vez realizado el entrenamiento, con los parámetros definidos anteriormente, se obtuvo un FIS con una distribución de las variables de entrada como la que se muestra en las figuras A2.1 a la A2.5 Anexo 2.

Como se puede apreciar, los subconjuntos borrosos están distribuidos por todo el universo de discurso, el cual está definido en el intervalo  $[0, 1]$  debido a la normalización de los datos que se hizo en el epígrafe 2.2.2. Después de un análisis del comportamiento de las variables eléctricas estudiadas (Promedio del quinto armónico de corriente, promedio THD,  $K_a$ ,) y del IFE y el coeficiente de resistencia se determinó que la distribución obtenida era la correcta. También se determinó que los subconjuntos de la variable están distribuidos de forma correcta en todo el universo discurso definido en el intervalo de  $[0, 1]$ , debido a que poseen un orden lógico, teniendo en cuenta los nombres que se le otorgaron. Finalmente, se logró el FIS de la Figura 2.11 para medir la altura de la escoria.



*Figura 2.11 Fis Altura De La Escoria*

Para el análisis de los resultados se utilizaron los gráficos que proporciona la herramienta de Matlab® ANFIS Editor. En la Figura 2.12 se puede ver la relación entre los datos de entrenamiento y la salida del FIS, obteniéndose un error promedio entre las señales de estos datos de 4.0757. En la Figura 2.13 se observa la relación entre la salida del FIS y los datos de Test, obteniéndose un error promedio entre las señales de estos datos de 16.0841. Por último, en la Figura 2.14, se observa la relación que existe entre los datos de chequeo y la salida del FIS, obteniéndose un error promedio de 21.919. En todas estas graficas se evidencia la buena correlación que existe entre los datos de estudio y la salida del FIS, demostrando la capacidad del modelo obtenido para predecir la altura de la escoria.

El visualizador de superficie presentado en la Figura 2.8 Anexo 2, permite observar la relación entre las variables de entrada y salida.

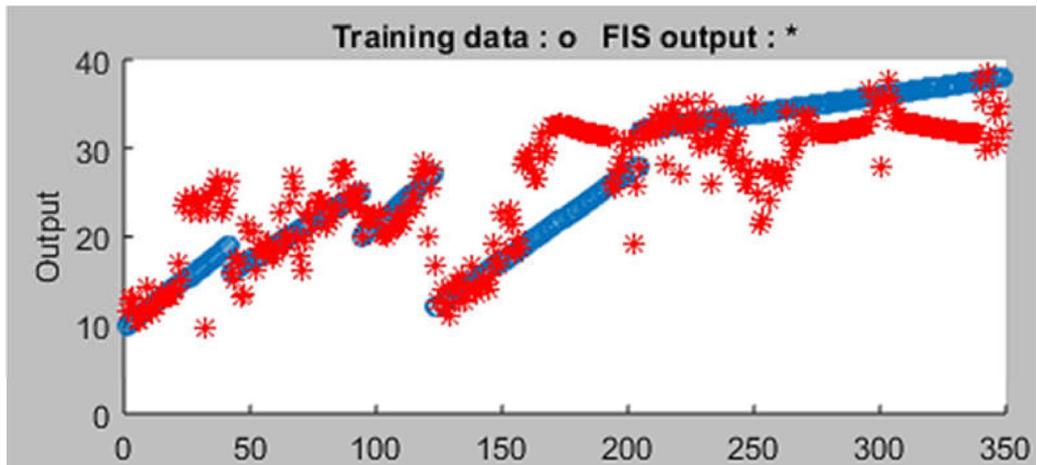


Figura 2.12. Error De Datos De Entrenamiento

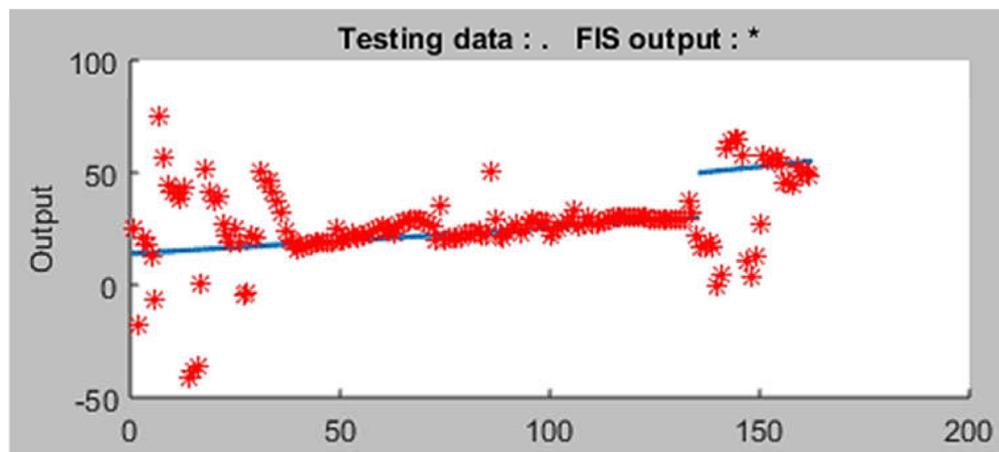


Figura 2.13 Error De Datos De Prueba

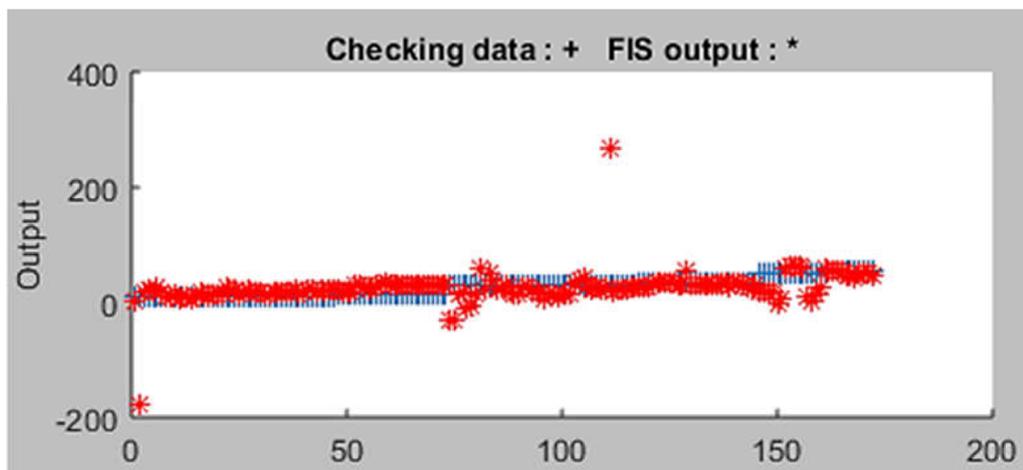


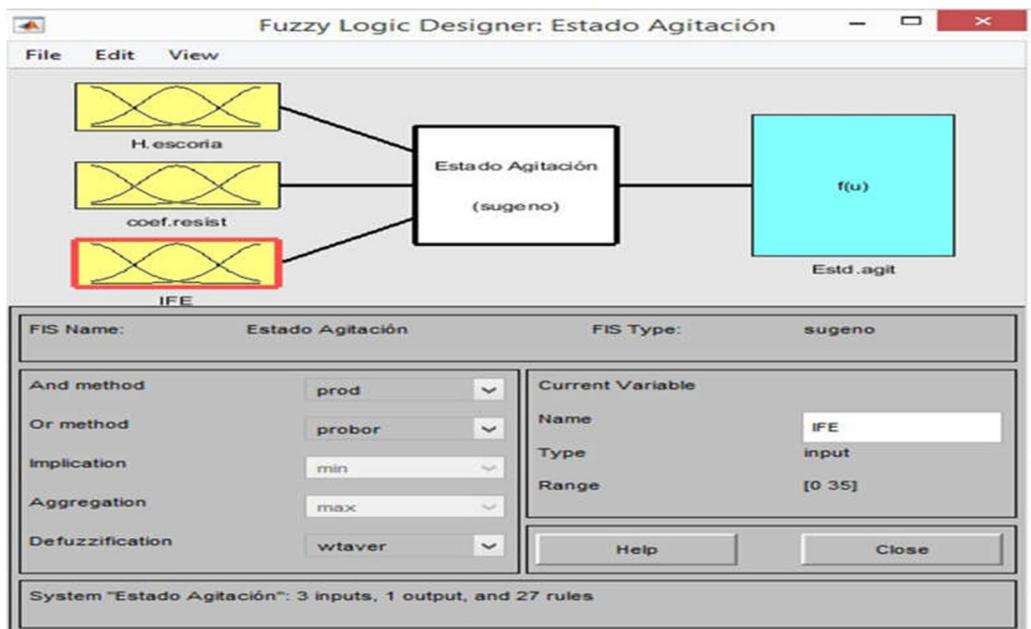
Figura 2.14 Error De Datos De Chequeo

### **2.3.2 MODELADO DEL SISTEMA DIFUSO ESTADO DE LA AGITACIÓN**

Luego de analizar las variables que intervienen en el proceso con ayuda de los datos obtenidos y descritos en epígrafe 2.2.2, se concluyó que las más representativas son el flujo, la diferencia de presión entre la entrada y salida de la rampa de control del insuflado de gas, la temperatura, el nivel de acero y la altura de la escoria.

Por lo antes descrito, a la entrada del sistema se utilizarán las variables, Índice de Flujo Efectivo (IFE), el Coeficiente de Resistencia del acero (CoefDR) y la altura de la escoria (h). Todos los datos obtenidos de las variables garantizaron los requerimientos según el tiempo de muestreo seleccionado. Sus valores se muestran en el Anexo 1, Tabla A1 para nueve coladas.

En la Figura 2.15 se ilustran las variables de entradas y salida del FIS Estado de la Agitación que debe permitir estimar el comportamiento de la homogenización de la mezcla de acero líquido en el Horno Cuchara en correspondencia con el proceso de insuflado del gas inerte. Para diseñar el FIS se utilizó el programa Matlab®, con la herramienta de trabajo denominada Fuzzy Logic Designer.



*Figura 2.15. Sistema Difuso Estado De La Agitación.*

*Capítulo2. Diseño de un sistema borroso para ajustar el valor deseado en el control.*

Luego se seleccionaron los universos de discurso y los subconjuntos de las variables de entrada a partir de los datos recogidos. Tabla 2.11

*Tabla 2.11 Subconjuntos Difusos Estado De La Agitación.*

<b>Universo Discurso</b>					
h (cm) Altura de Escoria		Coeficiente de Resistencia (H y T)		IFE (F y P)	
Menor	Mayor	Menor	Mayor	Menor	Mayor
9	39	0,94	4,69	2,12	32,87
0	45	0	5	0	35
<b>Subconjuntos Difusos</b>					
0 --- 16	Baja	0 --- 1,1	Bajo	0 --- 8	Bajo
14 ---- 30	Media	0.9 ---- 3.1	Medio	6 ----16	Medio
28-----45	Alta	2.9-----5	Alto	14 -----35	Alto

En las Figura A3.1, A3.2 y A3.3 Anexo 3, se muestran los Subconjuntos Borrosos y sus funciones de pertenencia de las variables de entrada. En las tres variables de entrada se utilizaron funciones z, pi y s por la suavidad de sus bordes, lo cual facilita transitorios con una dinámica más favorable para el proceso.

En la Figura A3.4 Anexo 3, se muestra la variable de salida Estado de Agitación, la cual representa a todos los consecuentes de cada regla del modelo TS de orden cero seleccionado.

Luego de definir los universos de discursos y los subconjuntos borrosos, se desarrolló la base de conocimientos mediante la determinación de las reglas. En la Figura A3.5 Anexo 3, se muestra el conjunto de las reglas teniendo en cuenta todas las posibles variantes para una salida en el rango de 0 a 1.

Observando el visualizador de reglas, Figura A3.6 Anexo 3, donde existen tres campos en los que se distinguen las diferentes funciones de membresía de las entradas. Cada reglón del visualizador constituye una regla, en este caso del 1 al 27, cada columna es una variable. Las tres primeras (color amarillo) se refieren a las funciones de membresía que corresponden al cuestionamiento de SI-CONDICIÓN. Dichas entradas proponen una respuesta al sistema de control que se expresa a través de la sentencia ENTONCES-ACCIÓN (color azul).

El visualizador de superficie que se expone en la Figura A3.7 Anexo 3, permite observar la relación entre las variables de entrada y salida.

### **2.3.3 MODELADO DEL SISTEMA DIFUSO AJUSTE FLUJO DESEADO**

A partir de la salida del FIS “Estado de la Agitación” se tendrá más información del comportamiento del proceso, lo cual permite tomar decisiones sobre el valor deseado en el control del insuflado de gas en el Horno Cuchara. Por lo tanto, con este dato y el valor actual del flujo deseado se logrará un nuevo valor deseado que permita adaptar el valor deseado del flujo de gas inerte a las circunstancias reales del proceso.

En este caso, para la entrada del sistema se utilizarán las variables, Flujo deseado seleccionado por el operador y la salida del FIS Estado de la Agitación tomados durante el mismo instante de tiempo. El valor del Flujo Deseado se muestra en la Tabla A1.1 el Anexo 1 para 9 coladas.

En la Figura 2.16 se ilustran las variables de entradas y salida del FIS Corrección del Flujo Deseado. El mismo debe proponer un ajuste del valor de flujo deseado que permita adaptar la homogenización de la mezcla de acero líquido en el Horno Cuchara, en correspondencia con las perturbaciones e incertidumbres del proceso de insuflado del gas inerte. Para diseñar el FIS se utilizó el programa Matlab®, con la herramienta de trabajo denominada Fuzzy Logic Designer.

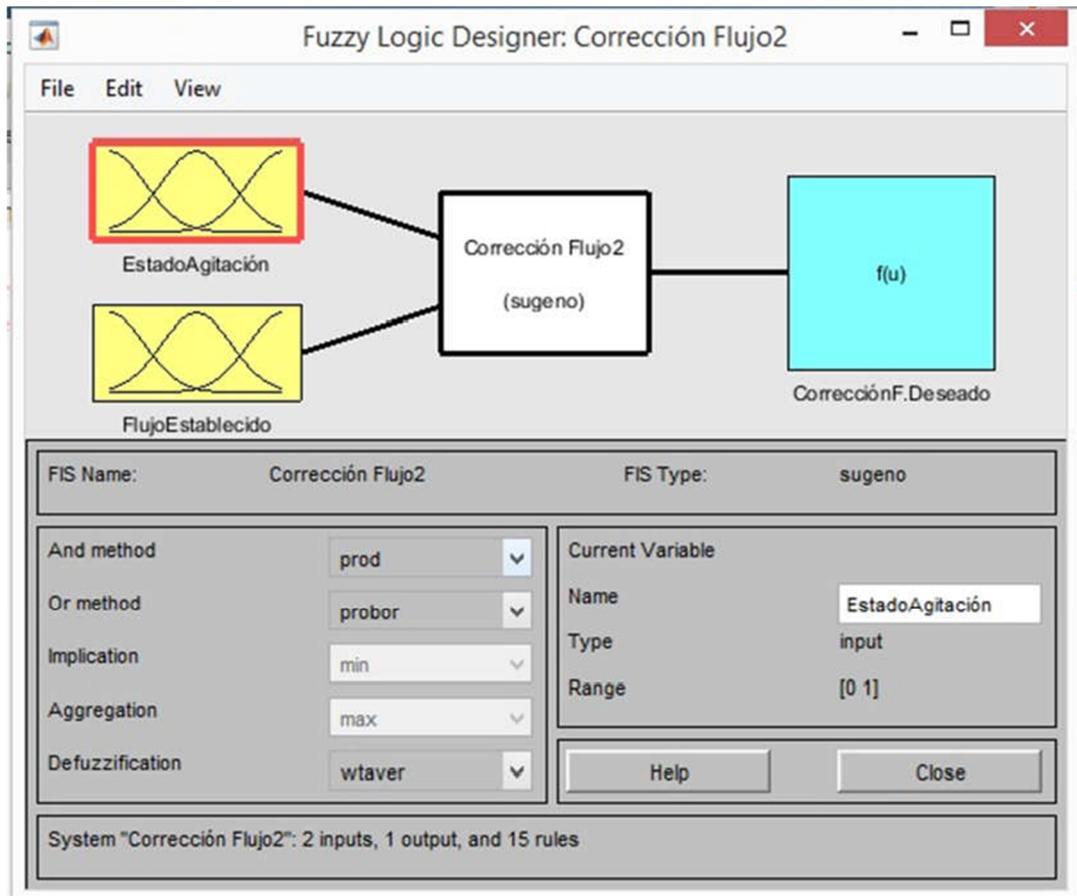


Figura 2.16. Sistema Difuso Corrección Del Flujo Deseado.

Luego se seleccionaron los universos de discurso y los subconjuntos de las variables de entrada a partir de los datos tomados de las dos variables de entrada, según se muestra en la Tabla 2.12.

Tabla 2.12. Subconjuntos Difusos Corrección Flujo Deseado

Universo Discurso					
Estado Agitación		Flujo Establecido		Corrección F. Deseado	
Menor	Mayor	Menor	Mayor	-140	140
0	1	0	459		
0	1	0	1000		
Subconjuntos Difusos					
0 --- 0.4	Baja	0 --- 50	Muy Bajo		
0.3 ---- 0,7	Buena	40 ---- 90	Bajo		
0.6-----1	Alta	80-----160	Medio		
		150 ---- 250	Alto		
		240-----1000	Muy Alto		

En las Figura A4.1 y Figura A4.2 Anexo 4, se muestran los Subconjuntos Borrosos de las variables de entrada y sus funciones de pertinencia. En las dos variables de entrada se utilizaron funciones z, pi y s por la suavidad de sus bordes, lo cual propicia transitorios con una dinámica más favorable para el proceso.

En la Figura A4.3 Anexo 4, se muestra la variable Corrección del Flujo Deseado que representa todos los consecuentes constantes de las reglas correspondientes al modelo TS de orden cero.

Luego de definir los universos de discursos y los subconjuntos borrosos se desarrolló la base de conocimientos mediante la determinación de las reglas. En la Figura A4.4 Anexo 4, se muestra el conjunto de reglas teniendo en cuenta todas las posibles variantes para los consecuentes en el intervalo de -140 a 140.

Observando el visualizador de reglas de la Figura A4.5 Anexo 4, existen dos campos en los que se distinguen las diferentes funciones de membresía de las entradas. Cada reglón del visualizador constituye una regla, en este caso del 1 al 15, cada columna es una variable. Las dos primeras (color amarillo) se refieren a las funciones de membresía que corresponden al cuestionamiento de SI-CONDICIÓN. Dichas entradas proponen una respuesta al sistema de control que se expresa a través de la sentencia ENTONCES-ACCIÓN (color azul).

El visualizador de superficie que se expone en la Figura A4.6 Anexo 4, permite observar la relación entre las variables de entrada y salida.

#### **2.4 RESULTADOS A ESCALA DE SIMULACIÓN DEL SISTEMA PROPUESTO PARA AJUSTAR EL VALOR DESEADO EN EL CONTROL DEL INSUFLADO DE GAS.**

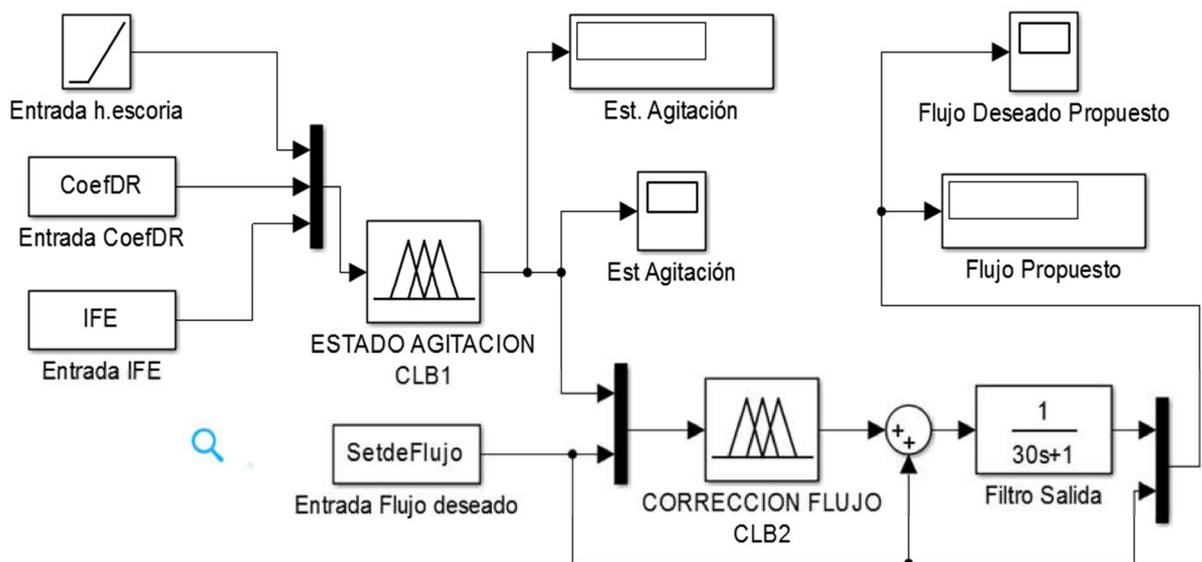
El objetivo de esta sección es evaluar el sistema propuesto en la Figura 2.40, observando cómo responde ante cambios en las variables perturbadoras. En el epígrafe 1.3 se planteó que hay que tomar en cuenta los cambios en las variables Temperatura, Altura de la escoria y diferencia entre la presión de entrada y la de salida en la Rampa del insuflado de gas. Esta última variable se seleccionó porque está muy relacionada con las condiciones físicas del tapón poroso.

Además, para el diseño de los experimentos a escala de simulación utilizando Matlab® se utilizó una representación de las principales variables. Estas fueron

seleccionadas de acuerdo con lo descrito en el Capítulo 1 y en particular en la Tabla 2.1. Las mismas fueron sintetizadas a partir de la experiencia en la planta, así como de la observación y análisis de los datos de las mediciones.

Atendiendo a la prioridad de demostrar la capacidad del esquema de la Figura 2.40 para compensar las incertidumbres de la planta ante perturbaciones y llevar a una medida acertada el valor deseado del control del insuflado de gas en el proceso de homogenización del Horno Cuchara, se diseñaron 5 experimentos. Para ello se consideraron las variantes más frecuentes y las más críticas de la población estudiada, por ejemplo: colada normal y colada con los casos críticos de funcionamiento del tapón poroso, coladas con diferencias en la altura de la escoria y coladas con cambios de temperatura.

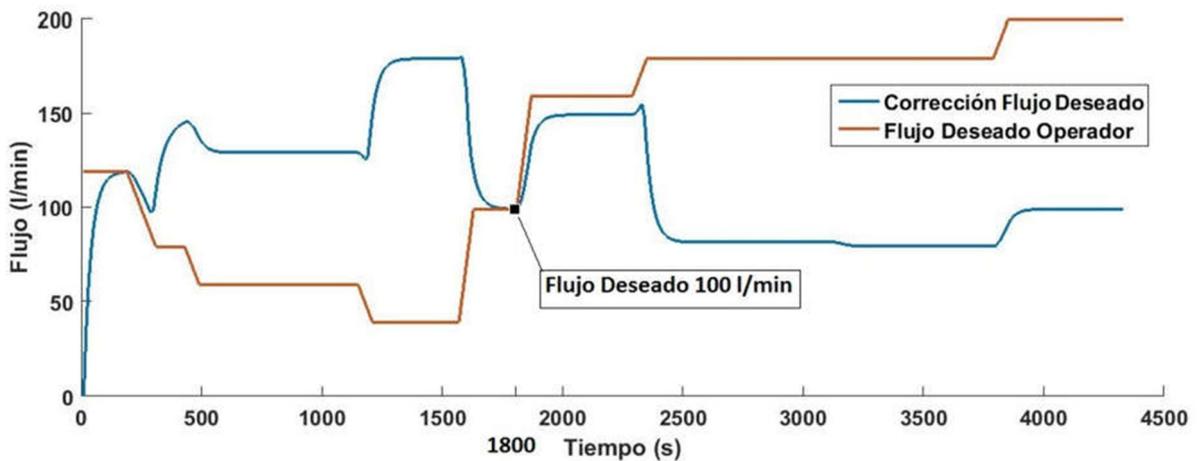
Las simulaciones se realizaron con el esquema de la Figura 2.17, donde el valor deseado del flujo de gas es el utilizado por el operador durante las coladas estudiadas. En el esquema se añade un filtro ponderado para suavizar los cambios del valor deseado, evitando transitorios indeseados en el flujo controlado como ocurre en el proceso real del caso de estudio. Este diagrama permite simular y observar gráficamente como respondería el sistema ante las perturbaciones.



*Figura 2.17 Modelo Propuesto, Corrección Del Flujo Deseado*

En los experimentos realizados las condiciones del sistema fueron seleccionadas a partir de situaciones reales. A continuación, se describen los mismos:

**Experimento 1:** Se simuló el funcionamiento del sistema borroso para un tiempo de 4320 s, empleando datos de la planta correspondientes a la Colada 13968, donde el estado físico del tapón fue normal en su primera colada, ver Figura 2.18 analizando el comportamiento de la presión de entrada y salida en la planta, siendo esta diferencia la variable de entrada, este experimento representa el 20 % de las coladas en la población estudiada (Tabla 2.3).



*Figura 2.18 Respuesta Del Sistema Con Tapón Normal*

**Experimento 2:** Para este caso se simuló el funcionamiento del sistema borroso para un tiempo de 4320 s, figura 2.19, empleando los datos de la planta correspondientes a la colada 13939 con estado físico del tapón no óptimo por ser su cuarta colada, el comportamiento de la diferencia entre la presión de entrada y salida en la planta para este caso es de menor valor y es la variable de entrada, representando el 30 % de coladas en la población estudiada.

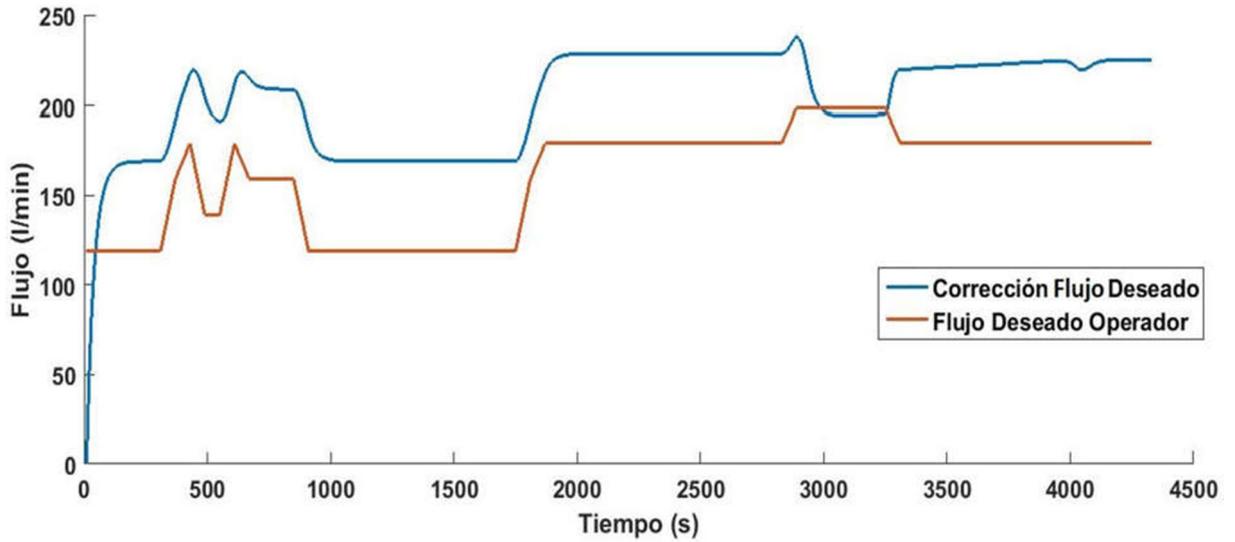


Figura 2.19 Respuesta Del Sistema Con Tapón Usado

**Experimento 3:** Se simuló el funcionamiento del sistema borroso para un tiempo de 4380 s, empleando datos de la planta correspondientes a la colada 13942 para una altura de la escoria pequeña, la Figura 2.20 representa el 30 % de coladas en la población estudiada.

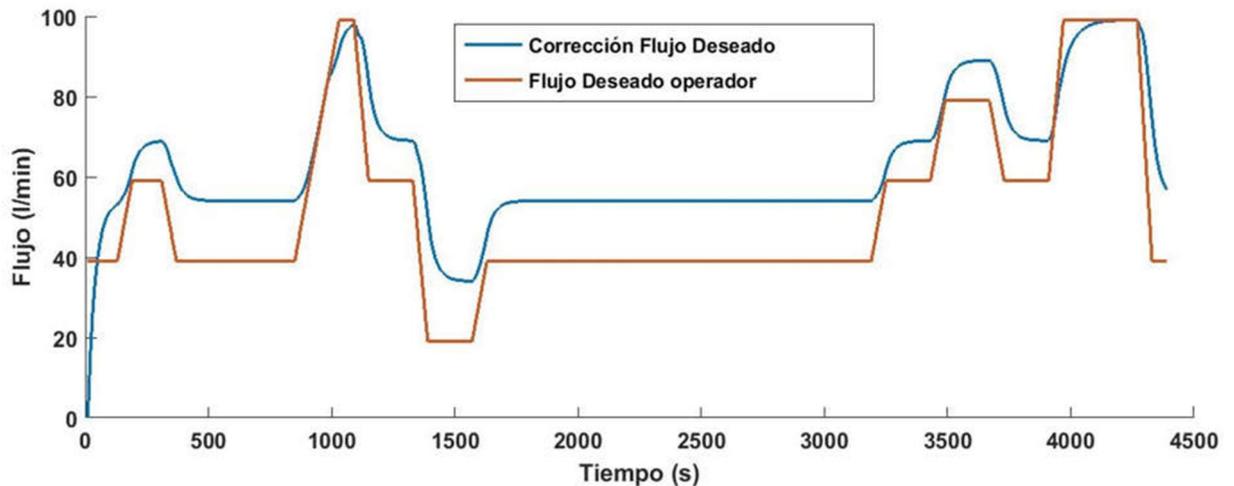


Figura 2.20 Respuesta Del Sistema Con Escoria Baja

**Experimento 4:** Se simuló el funcionamiento del sistema borroso para un tiempo de 8700 s, empleando datos de la planta correspondientes a la colada 13938 para una

altura de la escoria alta, la Figura 2.21 representa el 20 % de coladas en la población estudiada.

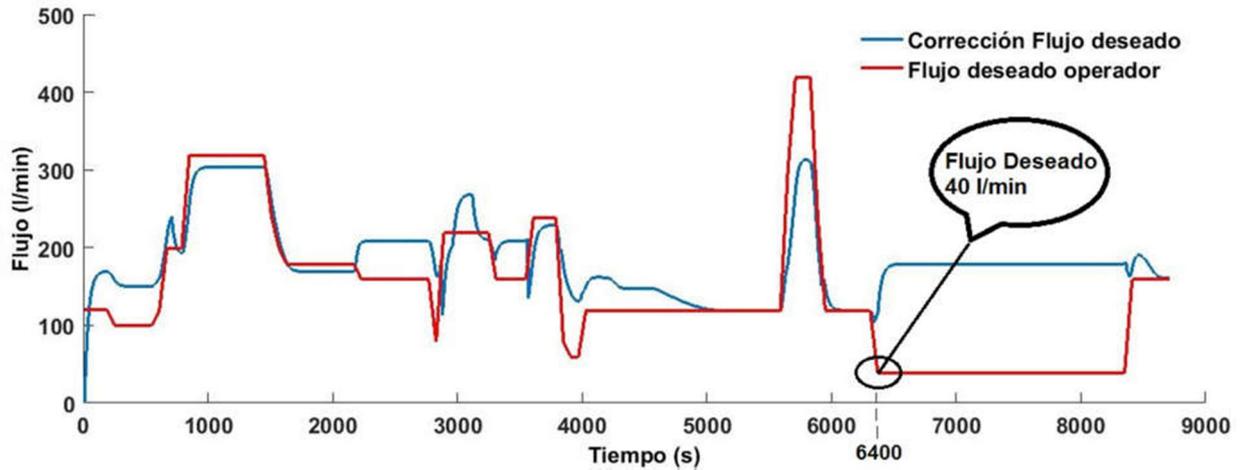


Figura 2.21 Respuesta Del Sistema Con Escoria Alta

**Experimento 5:** Se simuló el funcionamiento del sistema borroso propuesto en condiciones anormales de la temperatura, la Figura 2.22 con los datos de la Colada 13963 son representativos del 30 % de las coladas en la población estudiada, durante un tiempo de 3780 s.

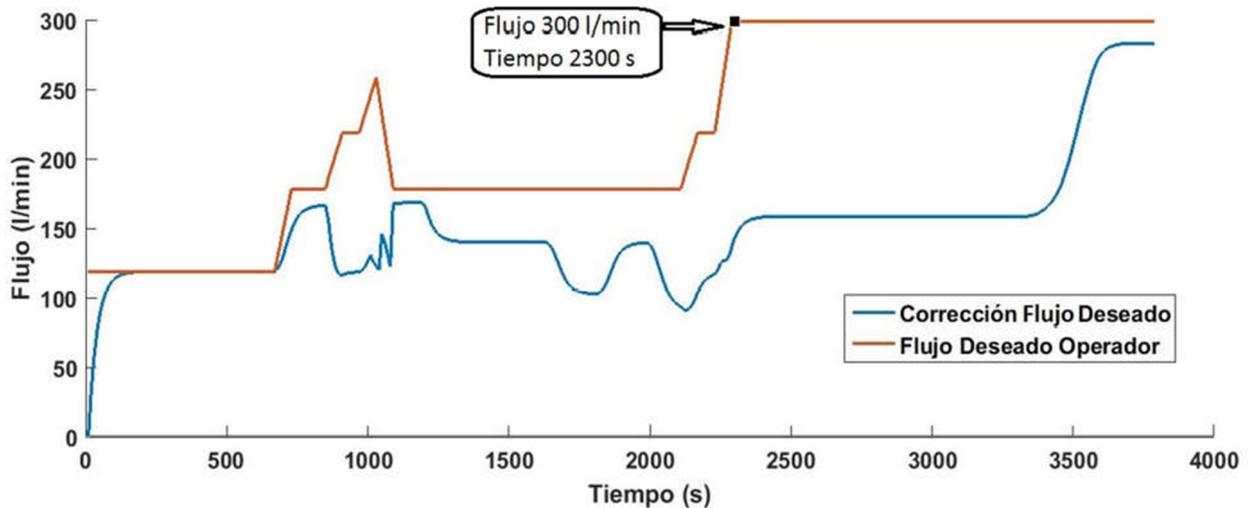
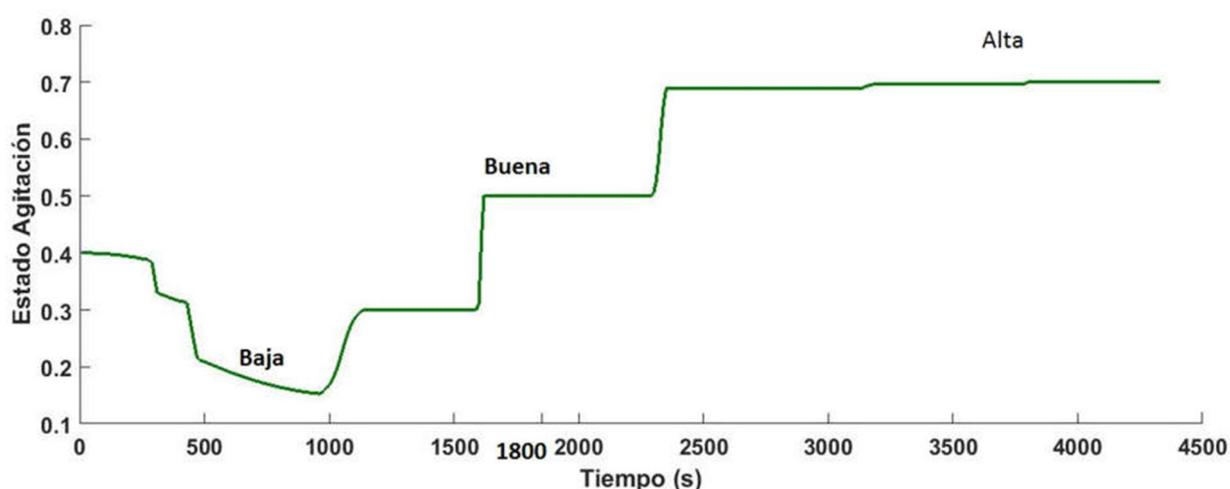


Figura 2.22 Respuesta Del Sistema Con Temperaturas Altas

## **2.5 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS**

Según el criterio de los expertos, después de aplicar el método de análisis de alternativa, los resultados alcanzados en los experimentos anteriores demuestran el funcionamiento satisfactorio del sistema borroso para condiciones normales y también para las críticas. Ejemplo de ello fue el resultado para el total de las 10 coladas seleccionadas con el propósito de representar los diferentes estados de incertidumbre ante perturbaciones, basados en la experiencia del operador.

En el Experimento 1, la Figura 2.41 ilustra que el sistema borroso propuesto satisface las especificaciones de diseño ante la presencia de cambios en la presión de entrada y salida de la rampa de control de flujo de gas, producidas en este caso para el escenario donde el estado del tapón poroso es óptimo. Durante los primeros 2000 s la corrección del sistema propone subir el valor deseado de flujo porque las mediciones de las variables de temperatura, altura de la escoria y estado de la agitación era más bajo al comienzo de la colada, ver Figura 2.23. A partir de ese instante y hasta el final de la colada la tendencia propuesta es a subir, porque el operador seleccionó valores más bajos al tener una referencia visual errónea del ojo metálico y la agitación, quizás no tuvo en cuenta que la temperatura era más alta, lo que provoca un menor Coeficiente de resistencia como se muestra en la Figura 2.24.



*Figura 2.23 Estado De La Agitación Con Tapón Normal*

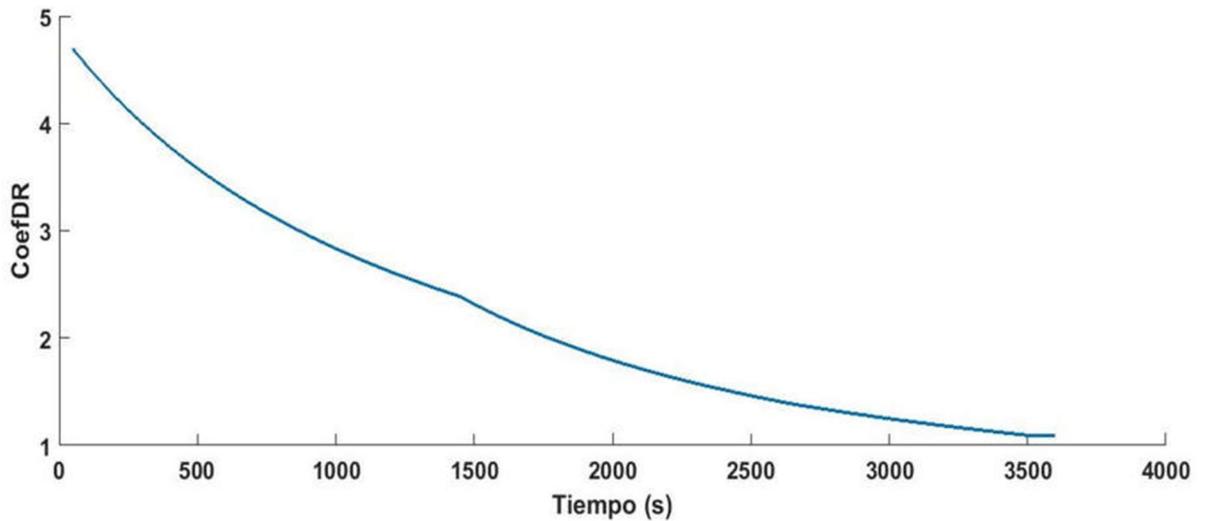
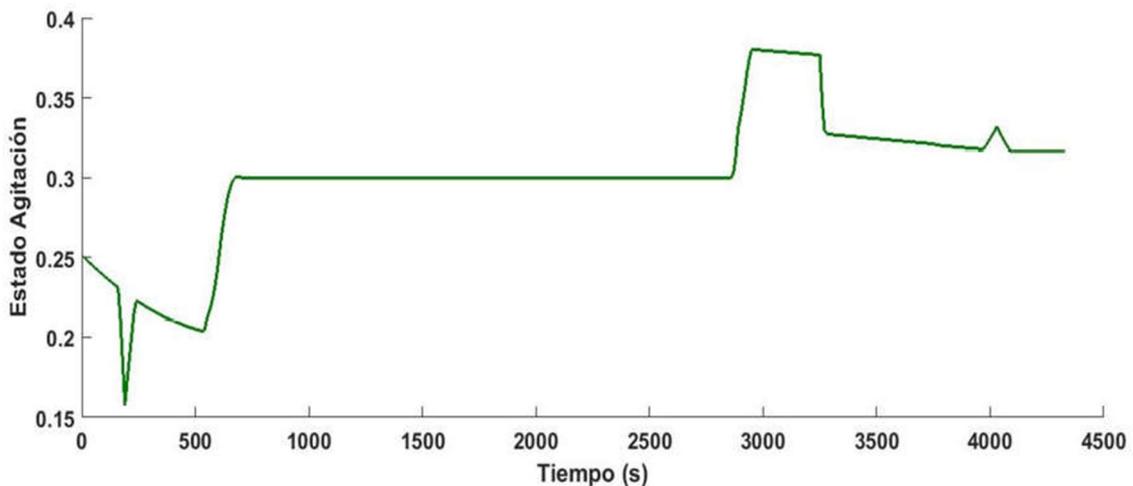


Figura 2.24 Coeficiente De Resistencia Con Tapón Normal

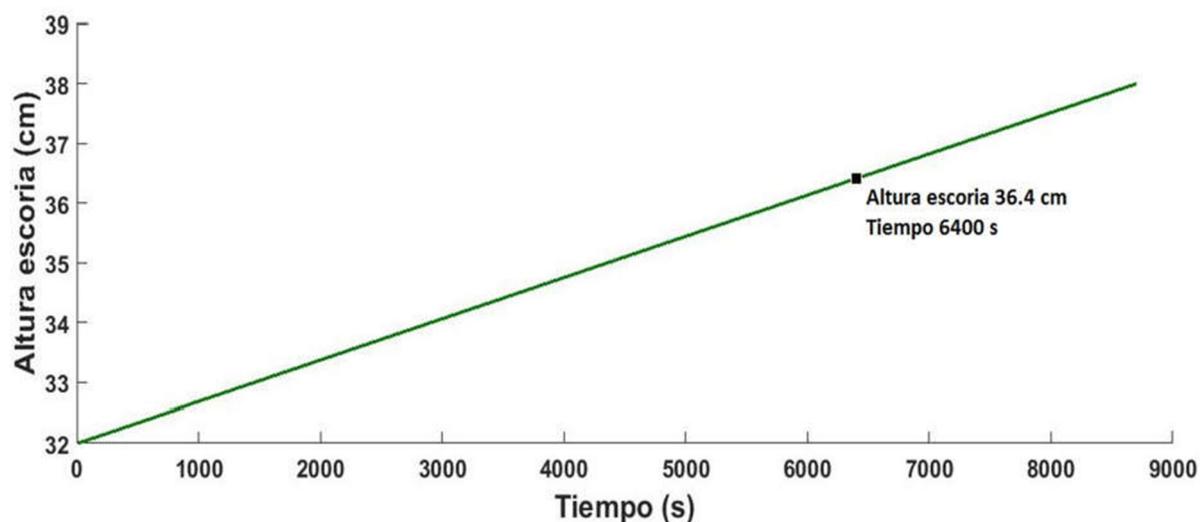
En el Experimento 2 ilustrado en la Figura 2.25, también el sistema borroso propuesto satisface las especificaciones de diseño ante la presencia de cambios en la presión de entrada y salida de la rampa de control de flujo de gas. En este caso, producidas para el escenario donde el estado del tapón poroso no era el más esperado debido a su edad y calidad de fabricación. Se observa que durante toda la colada, la corrección del sistema es a subir el valor deseado del flujo del sistema de control, ya que el estado de la agitación estuvo por debajo de 0.5 que es el adecuado, ver Figura 2.48, pues el operador a pesar de aumentar el flujo deseado no alcanzó lo necesario, según criterios de los expertos.



*Figura 2.25 Estado De La Agitación Con Tapón De 4 Coladas*

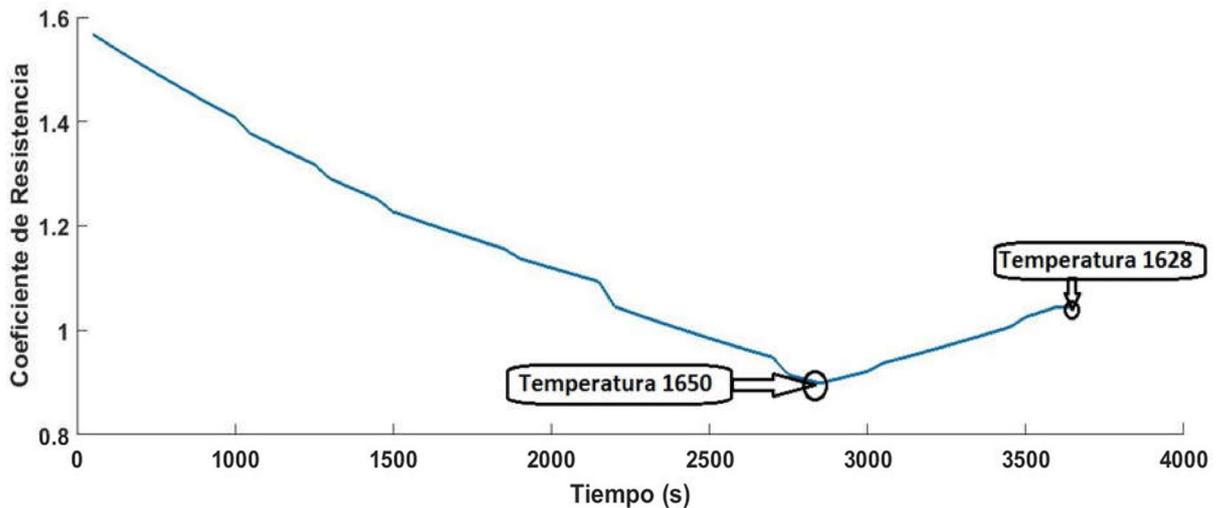
En el Experimento 3, la Figura 2.43 muestra como que el sistema borroso propuesto satisface las especificaciones de diseño ante la presencia de una altura de la escoria baja. Se observa que, durante toda la colada, la corrección del sistema es a subir levemente el valor deseado, incluso llegando a ser el mismo que escogió el operador, el mismo tuvo una buena respuesta, probablemente al estar la escoria baja si logró una buena referencia visual de la agitación.

En el Experimento 4, ilustrado en la Figura 2.44, se muestra como el sistema borroso propuesto satisface también las especificaciones de diseño ante la presencia de la perturbación altura de la escoria alta. Además, se observa que durante toda la colada hasta los 6400 s el valor deseado está próximo al seleccionado por el operador. A partir de ese instante se decide bajar a 40 l/min, la razón puede ser por no tener la certeza de que la escoria aun es mayor (36.4 cm), como se muestra en la Figura 2.26. Entonces se necesitaría una mayor agitación para favorecer los intercambios químicos y lograr la marca de acero en tiempos más cortos que los que presentó la colada, la misma presentó demoras en lograr a tiempo los parámetros químicos y físicos deseados.



*Figura 2.26 Altura De La Escoria*

El Experimento 5 se representa en la Figura 2.27 para el caso en que la Temperatura es más alta durante 2000 hasta 2800 s aproximadamente. La Figura 2.45 muestra como el sistema borroso propuesto satisface una vez más las especificaciones de diseño, pues este variable objeto de estudio influye notablemente en el comportamiento del proceso. El valor deseado está por debajo del seleccionado por el operador, el aumento de la temperatura es una perturbación al proceso que facilita que exista una mejor agitación con valores de flujo del gas más bajos, sin necesidad de exceder estos valores, pues esta decisión provoca desequilibrio en los valores de ajustes químicos del acero líquido, como ocurre cuando se agita con nitrógeno.



*Figura 2.27 Coeficiente De Resistencia Con Temperaturas Altas*

## **2.6 VALORACIÓN O CORROBORACIÓN DE LOS RESULTADOS ALCANZADOS**

Luego de analizar la repuesta del sistema, en los 5 experimentos principales, se utilizó el criterio de expertos con el método de análisis de alternativas para valorar comparativamente las decisiones tomadas en cuanto a cambiar adecuadamente el valor deseado del flujo de gas ante los cambios en el proceso.

Durante el desarrollo de esta investigación se tomaron en cuenta los criterios de varios especialistas. Al concluir la propuesta del sistema borroso para ajustar el valor

**Capítulo2. Diseño de un sistema borroso para ajustar el valor deseado en el control.**

deseado en el control del insuflado de gas en el horno cuchara, la solución fue sometida al criterio de estos expertos.

Se explicó a los mismos las desventajas que tiene el sistema de control actual y su afectación económica a la empresa debido a que no toma en cuenta las perturbaciones del proceso. Por tanto, las decisiones dependen de la experticia de los operadores, así como las características de la propuesta que resuelve tales problemas.

Para el análisis de los resultados se aplica el método de análisis de alternativa, el mismo consiste en establecer criterios comparativos entre más de una alternativa. En este caso serían la Alternativa 0, que corresponde al sistema de control funcionando sin la corrección del flujo deseado. La Alternativa 1, es la del sistema de control del insuflado de gas con la propuesta de adaptar el valor deseado.

Criterio	Tiempo de Respuesta	Valor Deseado Correcto	Rechazo a perturbaciones	Necesidad de Experiencia
Alternativa 0 (Operador)	Puntuación 2 a 5	Puntuación 2 a 5	Puntuación 2 a 5	Puntuación 2 a 5
Alternativa 1 (Sistema)	Puntuación 2 a 5	Puntuación 2 a 5	Puntuación 2 a 5	Puntuación 2 a 5

Para viabilizar la valoración por los expertos, se establecieron parámetros cualitativos en cada criterio:

Criterio	2	3	4	5
Tiempo de Respuesta	Largo	Medio	Corto	Muy Corto
Valor Deseado	Incorrecto	Regular	Bien	Muy Bien
Rechazo a perturbaciones	Bajo	Regular	Alto	Muy Alto
Necesidad de Experiencia	Alta	Media	Baja	Muy Baja

## *Capítulo 2. Diseño de un sistema borroso para ajustar el valor deseado en el control.*

En la fase práctica se escuchó y se grabaron las opiniones y sugerencias que emitieron los expertos. Entre estos participaron cuatro trabajadores experimentados, dos tecnólogos metalúrgicos, el Jefe de Producción, quien además tiene una gran experiencia en Horno Cuchara ya que fue trabajador en esa área y dos ingenieros automáticos del área de mantenimiento de la planta que conocen el proceso. Además, participaron en la evaluación cualitativa de las alternativas, basándose en los diferentes criterios.

### Experimento 1

Resultado de la evaluación cualitativa de las dos alternativas para el caso donde el tapón poroso era nuevo.

<b>Criterio</b>	<b>Alternativa 0 (Operador)</b>	<b>Alternativa 1 (Sistema)</b>
Tiempo de Respuesta	Medio (3)	Muy Corto (5)
Valor Deseado Correcto	Incorrecto (2)	Bien (4)
Rechazo a perturbaciones	Bajo (2)	Alto (4)
Necesidad de Experiencia	Alta (2)	Baja (4)
<b>Total</b>	<b>9</b>	<b>17</b>

### Experimento 2

Resultado de la evaluación cualitativa de las dos alternativas para el caso donde el tapón poroso era su cuarta colada.

<b>Criterio</b>	<b>Alternativa 0 (Operador)</b>	<b>Alternativa 1 (Sistema)</b>
Tiempo de Respuesta	Medio (3)	Muy Corto (5)
Valor Deseado Correcto	Regular (3)	Muy Bien (5)
Rechazo a perturbaciones	Regular (3)	Alto (4)
Necesidad de Experiencia	Alta (2)	Baja (4)
<b>Total</b>	<b>11</b>	<b>18</b>

*Capítulo 2. Diseño de un sistema borroso para ajustar el valor deseado en el control.*

Experimento 3

Resultado de la evaluación cualitativa de las dos alternativas para el caso donde la escoria fue la más baja de la población estudiada.

<b>Criterio</b>	<b>Alternativa 0 (Operador)</b>	<b>Alternativa 1 (Sistema)</b>
Tiempo de Respuesta	Corto (4)	Muy Corto (5)
Valor Deseado Correcto	Bien (4)	Muy Bien (5)
Rechazo a perturbaciones	Regular (3)	Alto (4)
Necesidad de Experiencia	Alta (2)	Baja (4)
<b>Total</b>	<b>13</b>	<b>18</b>

Experimento 4

Resultado de la evaluación cualitativa de las dos alternativas para el caso donde la escoria fue la más alta de la población estudiada.

<b>Criterio</b>	<b>Alternativa 0 (Operador)</b>	<b>Alternativa 1 (Sistema)</b>
Tiempo de Respuesta	Medio (3)	Muy Corto (5)
Valor Deseado Correcto	Regular (3)	Muy Bien (5)
Rechazo a perturbaciones	Regular (3)	Muy Alto (5)
Necesidad de Experiencia	Alta (2)	Baja (4)
<b>Total</b>	<b>11</b>	<b>19</b>

Experimento 5

Resultado de la evaluación cualitativa de las dos alternativas para el caso donde la temperatura fue la más alta de la población estudiada.

*Capítulo 2. Diseño de un sistema borroso para ajustar el valor deseado en el control.*

<b>Criterio</b>	<b>Alternativa 0 (Operador)</b>	<b>Alternativa 1 (Sistema)</b>
Tiempo de Respuesta	Largo (2)	Corto (4)
Valor Deseado Correcto	Incorrecto (2)	Muy Bien (5)
Rechazo a perturbaciones	Bajo (2)	Muy Alto (5)
Necesidad de Experiencia	Alta (2)	Baja (4)
<b>Total</b>	<b>8</b>	<b>18</b>

A continuación, el resumen de los resultados obtenido después de la evaluación de las dos alternativas en los cinco experimentos:

<b>Experimento</b>	<b>Evaluación Alternativa 0</b>	<b>Evaluación Alternativa 1</b>	<b>Efectividad Alternativa 0</b>	<b>Evaluación Alternativa 1</b>
1	9	17	35 %	65%
2	11	18	38%	62%
3	13	18	42%	58%
4	11	19	37%	63%
5	8	18	31%	69%
<b>Total</b>	<b>52</b>	<b>90</b>	<b>37%</b>	<b>63%</b>

Después de aplicar el método de análisis de alternativa se observan los resultados favorables a la Alternativa 1 correspondiente al Sistema Borroso. Cuando el valor deseado es ajustado por el sistema borroso se tiene un 63 % de efectividad respecto a un 37 % de efectividad para la Alternativa 0 que corresponde al ajuste del valor deseado de modo manual por el operador. De esta forma se evidencia la validez de la propuesta y se comprueba lo planteado en la hipótesis de esta investigación.

A continuación, se resumen las opiniones expuestas:

- Si se logra mayor información del proceso en tiempo real, es posible tener una respuesta más rápida y más acertada ante las perturbaciones;

- Los resultados de la investigación pueden mejorar las condiciones de trabajo de los operadores porque estos podrían tener una mejor visión del proceso desde la cabina de trabajo.
- Las mejoras de la calidad del control con la propuesta son muy importantes, porque puede reducir los riesgos que provoca agitar por encima o por debajo de lo requerido para lograr en menor tiempo una buena homogenización.
- Al integrar el sistema a la información de la empresa, los directivos tendrán ventajas para la toma de decisiones.
- Se podrá tener mayor acceso a la información real del proceso para reducir las operaciones erróneas y su afectación económica.
- Habrá menor cantidad de salidas no conformes del producto terminado, ya que una buena homogenización y un buen intercambio con la escoria reduce la cantidad de inclusiones no metálicas que afectan tanto la calidad interna como superficial de la palanquilla.
- Revisar si es factible incorporar otras variables al sistema propuesto para la homogenización del acero, como el caso de sensores de señales vibro-acústica que se usan internacionalmente.

## **CONCLUSIONES**

Luego de realizar el modelado del sistema borroso objeto de estudio se puede concluir lo siguiente:

- El sistema propuesto responde adecuadamente frente a las principales perturbaciones de la planta que afectan la calidad de la homogenización, lo cual se demostró a escala de simulación.
- Se demostró la necesidad del diseño del sistema a la medida, ya que tiene en cuenta la altura de la escoria que no había sido utilizada en los reportes consultados.
- La utilización de la lógica borrosa es una técnica apropiada para compensar las incertidumbres y perturbaciones en el proceso de homogenización del acero, así como la herramienta ANFIS para caracterizar la altura de la escoria.
- Los expertos valoran de manera positiva el sistema borroso propuesto.

- La factibilidad e impacto económico estimado es positiva, luego de implementar la configuración del sistema borroso propuesto en el caso de estudio.

## **CONCLUSIONES GENERALES**

---

- Al caracterizar los sistemas de control de homogenización del acero, a través del insuflado de gas en HC, se concluye que se ha incursionado en su desarrollo para hacerlos más eficientes y su modernización es importante para reducir costos, incrementar la calidad del producto terminado y mejorar las condiciones de trabajo.
- La investigación permitió identificar que las variables temperatura del acero, altura del metal líquido, altura de la escoria, flujo del gas y diferencia de presión en la rampa del caso de estudio podrían reflejar en no menos de un 63 % el efecto de las perturbaciones en el proceso de homogenización del HC.
- Con ayuda de los experimentos diseñados se obtuvieron datos para el análisis de la relación entre las variables seleccionadas y el estado de la homogenización.
- A partir del análisis de los datos y el intercambio con los expertos, fue posible elaborar una propuesta de Sistema de Inferencia Borroso que permite la corrección en línea del valor deseado de flujo del insuflado de gas en el proceso de homogenización del acero en el HC.
- Con ayuda de las pruebas a escala de simulación, las evaluaciones analíticas y la consulta a expertos de la planta, se demostró que el sistema borroso propuesto satisface los requerimientos deseados con una efectividad de al menos el 63 %, mientras que la toma de decisiones por el operador se calificó entorno al 37 %.

## **RECOMENDACIONES**

---

---

Como continuidad a los resultados alcanzados se recomienda:

- Efectuar otros estudios para profundizar en la posibilidad de otras variables que puedan reflejar el efecto de las perturbaciones al proceso.
- Para lograr un funcionamiento más cercano a la inteligencia y experticia del operador, realizar un mayor número de experimentos y toma de datos que posibiliten mejorar la precisión de los FIS utilizando sistemas neuro-difusos.
- Introducir en la práctica el sistema propuesto, en un primer momento como sistema de ayuda a la toma de decisiones para evaluar y mejorar su comportamiento, antes de utilizarlo completamente en modo automático.

**BIBLIOGRAFÍA**

- [1] A. E. V. Batista, "Incidencias de los costos en la eficiencia económica de la empresa Acinox-Las Tunas, causas que la provocan y su papel fundamental en la toma de decisiones," *Observatorio de la Economía Latinoamericana*, 2010.
- [2] D. C. G. González Yero, "Bases de la propuesta del proyecto IDi "Tecnologías avanzadas de automatización para la elaboración y afino del acero"," in *Taller "Tecnologías en la elaboración y afino del acero", ACINOX Tunas, 2018, p. 20.*
- [3] D. N. Da Silva, R. K. Vieira, A. K. Vieira, and M. de Santiago, "Optimización del Proceso de Innovación para Proyectos Internos en las Empresas," *Información tecnológica*, vol. 27, pp. 119-130, 2016.
- [4] J. A. Ramírez-Torres, "Desoxidación primaria del metal líquido durante el vertido del Horno de Arco Eléctrico a la cuchara y proceso de ajuste y afino de Horno Cuchara.," 2021.
- [5] A. A. GARCIA, "Técnicas de soplado para la metalurgia en cucharas," *BOL. SOC. ESP. CERAM. VIDR*, vol. 28, pp. 395-405, 1989.
- [6] N. Behera, A. Wohaiishi, R. Subramanian, N. Tewari, R. Bommaraju, and D. S. Tech, "Optimization of argon stirring at Hadeed ladle furnace by application of TruStir technology," in *AISTech Conference*, 2014.
- [7] J. YANG, L. TIAN, and A. FEI, "A new vibration ladle slag detection system," ed: AISTech, 2014.
- [8] K. Yuriy, K. David, K. Iluya, K. Vadim, D. Ilya, and O. Andrey, "Application of vibroacoustic monitoring technique on a ladle furnace unit during steel treatment," in *METAL 2007: 16 th International Metallurgical and Materials Conference*, 2007.
- [9] J. Yenus, G. Brooks, and M. Dunn, "Principal component analysis of vibration signal in ladle metallurgy," ed: AISTech, 2016.
- [10] M. Burty, C. Pussé, D. Sheng, C. Dannert, H. KOCHNER, L. Sancho, *et al.*, "Development of advanced methods for the control of ladle stirring process," *EUR*, pp. 1-139, 2007.
- [11] Y. V. Kostetskii, I. Kvasov, I. Degtyarenko, and D. Kukui, "Control and management of the out-of-furnace treatment of metal using ladle vibrations," *Russian Metallurgy (Metally)*, vol. 2009, pp. 595-597, 2009.
- [12] K. Krishnapisharody and G. Irons, "A model for slag eyes in steel refining ladles covered with thick slag," *Metallurgical and Materials Transactions B*, vol. 46, pp. 191-198, 2015.
- [13] E. Navas Medina, B. Cabrera, M. Aerle, R. F. Beltrán Reyna, H. C. Terán Herrera, O. B. Arteaga López, *et al.*, "Fusión en la metalurgia," ed, 2015.
- [14] J. L. Enríquez Berciano and E. Tremps Guerra, "Metalurgia Secundaria," 2007.
- [15] D. A. Gavilanes Ruiz, "Diseño de una escoria sintética desulfurante para el proceso de afino en el horno cuchara de una acería," Quito, 2016., 2016.
- [16] M. Iguchi, K.-i. Miyamoto, S. Yamashita, D. Iguchi, and M. Zeze, "Spout eye area in ladle refining process," *ISIJ international*, vol. 44, pp. 636-638, 2004.
- [17] D. Mazumdar and J. Evans, "A model for estimating exposed plume eye area in steel refining ladles covered with thin slag," *Metallurgical and Materials Transactions B*, vol. 35, pp. 400-404, 2004.

- [18] K. Krishnapisharody and G. A. Irons, "An extended model for slag eye size in ladle metallurgy," *ISIJ international*, vol. 48, pp. 1807-1809, 2008.
- [19] C. R. Bueno Montalvo, "Beneficios tributarios para empresas que invierten en desarrollo e innovación (I+ D+ i)[18 de mayo de 2016]," 2016.
- [20] J. M. Chambergó Vargas, "Balance termodinámico en la fabricación del acero y la optimización del patrón de carga metálica para minimizar costos de producción en el horno eléctrico de la corporación Aceros Arequipa SA," 2012.
- [21] L. D. Landau and E. M. Lifshitz, *Mecánica* vol. 1: Reverté, 1970.
- [22] B. Li, H. Yin, C. Q. Zhou, and F. Tsukihashi, "Modeling of three-phase flows and behavior of slag/steel interface in an argon gas stirred ladle," *ISIJ international*, vol. 48, pp. 1704-1711, 2008.
- [23] M. Peranandhanthan and D. Mazumdar, "Modeling of slag eye area in argon stirred ladles," *ISIJ international*, vol. 50, pp. 1622-1631, 2010.
- [24] G. Barroso Rodríguez and M. Delgado Fernández, "La gestión por proyectos y cambio organizacional," *Revista Tecnociencia Universitaria Bolivia*, vol. 5, p. 8, 2007.
- [25] W. Lou and M. Zhu, "Numerical simulations of inclusion behavior in gas-stirred ladles," *Metallurgical and Materials Transactions B*, vol. 44, pp. 762-782, 2013.
- [26] S. Chatterjee and K. Chattopadhyay, "Physical modeling of slag 'eye' in an inert gas-shrouded tundish using dimensional analysis," *Metallurgical and Materials Transactions B*, vol. 47, pp. 508-521, 2016.
- [27] J. Yenus, G. Brooks, M. Dunn, and R. Kadam, "Application of vibration and sound signals in monitoring iron and steelmaking processes," *Ironmaking & Steelmaking*, pp. 1-10, 2018.
- [28] M. A. Carmona Concha, "Análisis mineralógico de escoria de fundición usando sistema de visión," Universidad de Concepción. Facultad de Ingeniería. Departamento de ..., 2012.
- [29] D. Mazumdar, P. Dhandapani, and R. Sarvanakumar, "Modeling and optimisation of gas stirred ladle systems," *ISIJ International*, vol. 57, pp. 286-295, 2017.
- [30] R. González-Bernal, G. Solorio-Díaz, A. Ramos-Banderas, E. Torres-Alonso, C. A. Hernández-Bocanegra, and R. Zenit, "Effect of the Fluid-Dynamic Structure on the Mixing Time of a Ladle Furnace," *steel research international*, vol. 89, p. 1700281, 2018.
- [31] D. Takahashi, M. Kamo, Y. Kurose, and H. Nomura, "Deep steel desulphurisation technology in ladle furnace at KSC," *Ironmaking & steelmaking*, vol. 30, pp. 116-119, 2003.
- [32] A. Kushnarev, "Use of injection technologies for the out-of-furnace desulfurization of vanadium-bearing pig iron/semifinished product in the converter shop at the nizhniy tagil metallurgical combine," *Metallurgist*, vol. 48, pp. 503-506, 2004.
- [33] M. Ramírez-Argáez, J. Tapia, J. Espinoza, and E. Alcantar, "Modelación matemática del mezclado en hornos-cucharas agitadas con gas," *Revista de Metalurgia*, vol. 42, pp. 56-75, 2006.
- [34] Q. Cao and L. Nastac, "An Innovative Modeling Approach for Predicting the Desulfurization Kinetics in an Argon-Stirred Ladle Furnace," in *TMS Annual Meeting & Exhibition*, 2018, pp. 141-148.
- [35] M. D. R. López, *Evaluación de proyectos para ingenieros*: Ecoe ediciones, 2015.
- [36] G. Olano Estevez, "Estudio de las causas y condiciones que propician la formación de sopladura en el producto final en la empresa de ACINOX-Tunas," Departamento Metalurgia-Química, 2009.

- 
- [37] L. Li, Z. Liu, M. Cao, and B. Li, "Large eddy simulation of bubbly flow and slag layer behavior in ladle with discrete phase model (DPM)-volume of fluid (VOF) coupled model," *JOM*, vol. 67, pp. 1459-1467, 2015.
- [38] J. Birat, "A futures study analysis of the technological evolution of the EAF by 2010," *Revue de Métallurgie-International Journal of Metallurgy*, vol. 97, pp. 1347-1363, 2000.
- [39] S. Chatterjee and K. Chattopadhyay, "Formation of slag 'eye' in an inert gas shrouded Tundish," *ISIJ International*, vol. 55, pp. 1416-1424, 2015.
- [40] S. Rey, M. Susana, L. Robayo, and F. Patricio, "Estudio experimental de la desulfuración para fundición gris con agitación de gas inerte," *QUITO/EPN/2007*, 2007.
- [41] J. Madías, "Sistemas de control."
- [42] M. G. U, "Estudio de Impacto Acústico Siderúrgica AZA," *Seminario de Acústica*.
- [43] R. Haber, "CONTROL BORROSO."
- [44] J. G. Pereira, "Sistema neuro difuso para caracterizar la escoria espumosa en el Horno de Arco Eléctrico de ACINOX Las Tunas," 2019.
- [45] E. L. Wilson, *Artificial intelligence-based computer modeling tools for controlling slag foaming in electric arc furnaces*: The University of Alabama, 2001.
- [46] A. Parsapoor, B. M. Dehkordi, and M. Moallem, "Predicting foaming slag quality in electric arc furnace using power quality indices and ANFIS," in *2010 18th Iranian Conference on Electrical Engineering*, 2010, pp. 861-866.
- [47] S. Landa, T. Rodriguez, J. Munoz, and J. Larraudogoitia, "Dynamic control of slag foaming at Sidenor Basauri Meltshop," *Archives of Metallurgy and Materials*, vol. 53, pp. 419-424, 2008.
- [48] D. Vieira, R. A. M. d. Almeida, W. V. Bielefeldt, and A. C. F. Vilela, "Slag evaluation to reduce energy consumption and EAF electrical instability," *Materials Research*, vol. 19, pp. 1127-1131, 2016.
- [49] B. Martín, N. Medrano, T. Pollán, and A. Sanz, "Redes neuronales y sistemas borrosos: un libro de texto en español," 1970.
- [50] F. Luis, R. F. Rodríguez, and R. J. P. Lauzán, "473-LA INTELIGENCIA ARTIFICIAL (IA) COMO RECURSO DIDÁCTICO."
- [51] J.-S. Jang, "ANFIS: adaptive-network-based fuzzy inference system," *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics*, vol. 23, pp. 665-685, 1993.
- [52] A. A. Behar and M. M. Iranzo, *Identificación y control adaptativo*: Pearson Educación, 2003.

## ANEXOS

## Anexo 1

TABLA A.1.1 RECOLECCIÓN DE DATOS

Colada	Hora	No de Cazuela	No. Coladas Tapón	No. Coladas Cazuela	h (cm) Altura de Escoria	H (cm) Altura del acero	Temp. del acero	DeltaP (Bar)	Coficiente de Resistencia (H y T)	Coficiente de Resistencia (H, T y P)	Flujo del Gas de Insuflado (NL/min)	IFE (F y P)	Diámet. del Ojo (MP, P, M, G, MG)	Agitación (M, R, B, A, MA)
13934	10:17	9	6	8	32	2,2	1540	8,2	2,96	3,75586457	120	9,46	MP	R
13934	10:24	9	6	8	32,53	2,2	1548,3	7,9	2,52	3,31396527	118	8,96	MP	R
13934	10:25	9	6	8	33,06	2,2	1556,6	7,5	2,19	3,03556717	156	11,25	MP	R
13934	10:28	9	6	8	33,59	2,2	1564,9	7	1,94	2,87723907	177	11,91	MP	R
13934	10:31	9	6	8	34,12	2,2	1573,2	6,5	1,74	2,77811723	198	12,38	P	R
13934	10:33	9	6	8	34,65	2,2	1581,5	5,6	1,57	2,92237383	282	15,18	P	R
13934	10:40	9	6	8	35,18	2,2	1589,7	5,8	1,44	2,57980902	281	15,67	P	R
13934	10:47	9	6	8	35,71	2,2	1598	4,7	1,33	2,93231357	340	15,37	P	R
13934	10:58	9	6	8	36,24	2,2	1603,5	4,6	1,26	2,84877903	340	15,04	P	R
13934	11:13	9	6	8	36,77	2,2	1608,9	5,5	1,20	2,27097829	280	14,81	P	R
13934	11:23	9	6	8	37,3	2,2	1614,3	5,5	1,15	2,1693346	281	14,86	P	R
13934	11:29	9	6	8	37,83	2,2	1619,8	8,2	1,10	1,39270718	100	7,88	P	R
13934	11:37	9	6	8	38,36	2,2	1625,2	8,3	1,05	1,31940399	100	7,98	P	R
13934	11:45	9	6	8	38,89	2,2	1630,6	8,3	1,01	1,26734118	100	7,98	P	R
13934	11:51	9	6	8	39	2,2	1636	9,2	0,97	1,10026619	100	8,85	P	R
13938	08:36	9	2	11	32	2,25	1533	8,4	3,56	4,40597668	198	15,99	M	B
13938	08:40	9	2	11	32,35	2,25	1544,8	7,6	2,75	3,76043529	320	23,38	M	B
13938	08:45	9	2	11	32,7	2,25	1556,6	8,8	2,24	2,64509749	320	27,08	M	B
13938	08:52	9	2	11	33,05	2,25	1568,4	8,8	1,89	2,23114324	177	14,98	M	B
13938	09:01	9	2	11	33,4	2,25	1580,2	8,8	1,63	1,92922248	158	13,37	M	B
13938	09:11	9	2	11	33,75	2,25	1592	9,3	1,44	1,60791589	84	7,51	MP	M
13938	09:13	9	2	11	34,1	2,25	1603,8	8,5	1,28	1,57189229	218	17,82	M	B
13938	09:19	9	2	11	34,45	2,25	1604	8,7	1,28	1,53298971	220	18,40	M	B
13938	09:21	9	2	11	34,8	2,25	1604	8,9	1,28	1,4985405	159	13,61	M	B
13938	09:30	9	2	11	35,15	2,25	1627	8,7	1,06	1,26986461	236	19,74	M	B
13938	09:35	9	2	11	35,5	2,25	1627	9,1	1,06	1,21404639	116	10,15	P	B
13938	09:45	9	2	11	35,85	2,25	1631	9,1	1,03	1,17885664	120	10,50	P	B
13938	10:05	9	2	11	36,2	2,25	1631	8,1	1,03	1,32439449	422	32,87	MG	MA
13938	10:13	9	2	11	36,55	2,25	1645	9	0,94	1,08216971	116	10,04	M	B
13938	10:16	9	2	11	36,9	2,25	1645	9,5	0,94	1,02521341	39	3,56	MP	R
13938	10:40	9	2	11	37,25	2,25	1628	9,4	1,05	1,1665943	39	3,53	MP	R
13938	10:50	9	2	11	37,6	2,25	1629	8,8	1,05	1,23697206	164	13,88	MP	R
13938	10:57	9	2	11	37,95	2,25	1636	9,4	1,00	1,10133028	39	3,53	MP	R
13938	11:02	9	2	11	38	2,25	1636	9,5	1,00	1,08973733	39	3,56	MP	R
13939	11:45	10	2	45	29	2,21	1568	9,1	1,86	2,1305345	143	12,51	M	B
13939	12:11	10	2	45	29,51	2,21	1527	9,3	4,11	4,59863946	137	12,25	P	B
13939	14:05	9	4	12	30,02	2,21	1534,5	8,2	3,37	4,27296443	120	9,46	P	R
13939	14:18	9	4	12	30,53	2,21	1542	7,4	2,85	4,01017594	157	11,17	P	R
13939	14:22	9	4	12	31,04	2,21	1549,5	8,2	2,47	3,1385491	120	9,46	P	R
13939	14:31	9	4	12	31,55	2,21	1557	8,2	2,18	2,77075037	124	9,78	P	R
13939	14:35	9	4	12	32,06	2,21	1564,5	8,3	1,96	2,45023135	122	9,74	P	R
13939	14:40	9	4	12	32,57	2,21	1572	7,6	1,77	2,42186841	177	12,93	P	R
13939	14:46	9	4	12	33,08	2,21	1579,5	7,5	1,62	2,24137155	177	12,76	P	R
13939	14:52	9	4	12	33,59	2,21	1584	8	1,54	1,99737609	178	13,69	P	R
13939	15:01	9	4	12	34,1	2,21	1605,4	7,6	1,24	1,70220289	198	14,47	P	R
13939	15:09	9	4	12	34,61	2,21	1627	7,8	1,04	1,39120723	178	13,35	P	R
13939	15:21	9	4	12	35	2,21	1625	7,9	1,06	1,39440909	179	13,60	MP	R
13939	15:25	9	4	12	35	2,21	1625	7,8	1,06	1,41228613	179	13,43	MP	R

Colada	Hora	No de Cazuela	No. Coladas Tapón	No. Coladas Cazuela	h (cm) Altura de Escoria	H (cm) Altura del acero	Temp. del acero	DeltaP (Bar)	Coficiente de Resistencia (H y T)	Coficiente de Resistencia (H, T y P)	Flujo del Gas de Insuflado (NL/mi <sub>n</sub> )	IFE (F y P)	Diámet. del Ojo (MP, P, M, G, MG)	Agitación (M, R, B, A, MA)
13942	09:14	9	1	15	9	2,45	1564	9,2	2,18	2,46785058	39	3,45	G	MA
13942	09:15	9	1	15	9,28	2,45	1567,5	9,3	2,08	2,32662192	39	3,49	MP	B
13942	09:16	9	1	15	9,56	2,45	1571	9,2	1,99	2,24637681	63	5,57	P	A
13942	09:18	9	1	15	9,84	2,45	1574,5	9,3	1,90	2,12678937	39	3,49	MP	B
13942	09:27	9	1	15	10,12	2,45	1578	9,7	1,82	1,95512432	39	3,64	MP	B
13942	09:34	9	1	15	10,4	2,45	1581,5	9,3	1,75	1,95856874	63	5,63	G	A
13942	09:36	9	1	15	10,68	2,45	1585	10	1,68	1,75217391	22	2,12	G	A
13942	09:41	9	1	15	10,96	2,45	1588	9,8	1,63	1,73147154	38	3,58	MP	R
13942	09:47	9	1	15	11,24	2,45	1594	9,5	1,53	1,68004169	38	3,47	MP	R
13942	09:55	9	1	15	11,52	2,45	1600	9,5	1,45	1,58583374	38	3,47	P	B
13942	10:09	9	1	15	11,8	2,45	1623	9,4	1,19	1,31914894	38	3,43	MP	R
13942	10:12	9	1	15	12,08	2,45	1623	9,2	1,19	1,34782609	63	5,57	P	B
13942	10:14	9	1	15	12,36	2,45	1623	9,2	1,19	1,34782609	59	5,22	P	B
13942	10:18	9	1	15	12,64	2,45	1648	9,2	1,00	1,13043478	77	6,81	P	B
13942	10:20	9	1	15	12,92	2,45	1636	9,2	1,08	1,22529644	59	5,22	P	B
13942	10:24	9	1	15	13,2	2,45	1634	9,1	1,10	1,25633232	97	8,49	P	A
13942	10:25	9	1	15	13,48	2,45	1637	9,1	1,08	1,23015873	97	8,49	P	A
13942	10:29	9	1	15	13,76	2,45	1628	9,4	1,15	1,27029157	38	3,43	P	B
13942	10:30	9	1	15	14	2,45	1629	9,5	1,14	1,24767802	38	3,47	P	B
13963	09:00	7	3	10	22	2,23	1583	9,6	1,57	1,69820484	116	10,71	MP	M
13963	09:11	7	3	10	22,89	2,23	1591,3	9,5	1,44	1,57118272	120	10,96	MP	M
13963	09:13	7	3	10	23,78	2,23	1599,6	8,7	1,32	1,58207606	182	15,23	MP	M
13963	09:17	7	3	10	24,67	2,23	1607,9	8,2	1,23	1,55729158	218	17,19	MP	M
13963	09:23	7	3	10	25,56	2,23	1608	8,8	1,23	1,44985077	182	15,40	MP	M
13963	09:32	7	3	10	26,45	2,23	1618	8,8	1,13	1,33386271	182	15,40	M	R
13963	09:43	7	3	10	27,34	2,23	1628	9	1,05	1,20761233	178	15,40	M	R
13963	09:47	7	3	10	28,23	2,23	1628	8,1	1,05	1,34179148	300	23,37	M	R
13963	09:59	7	3	10	29,12	2,23	1628	8,4	1,05	1,29387035	295	23,83	P	R
13963	10:16	7	3	10	30	2,23	1628	8,3	1,05	1,30945915	297	23,70	P	R
13964	11:47	9	2	26	20	2,25	1591	9	1,45	1,67846731	119	10,30	MP	M
13964	11:55	9	2	26	21,16	2,25	1595	8,5	1,40	1,70750653	161	13,16	MP	M
13964	12:03	9	2	26	22,32	2,25	1598	8,6	1,36	1,63943318	160	13,23	M	R
13964	12:12	9	2	26	23,48	2,25	1603,6	8,6	1,29	1,55642391	160	13,23	M	M
13964	12:17	9	2	26	24,64	2,25	1609,2	8,7	1,23	1,46438776	158	13,22	M	M
13964	12:21	9	2	26	25,8	2,25	1615	8,2	1,17	1,47981624	197	15,53	M	M
13964	12:26	9	2	26	27	2,25	1615	9,3	1,17	1,30478421	197	17,62	M	M
13965	13:31	7	4	11	20	2,3	1570	9,3	1,89	2,11326089	117	10,46	M	B
13965	13:35	7	4	11	20	2,3	1574	9,9	1,80	1,88715067	77	7,33	M	B
13965	13:37	7	4	11	20,5	2,3	1578	8,6	1,71	2,07018621	157	12,98	M	B
13965	13:42	7	4	11	21	2,3	1582	8,8	1,63	1,93220904	160	13,54	M	B
13965	13:52	7	4	11	21,5	2,3	1585	8,8	1,58	1,86920223	161	13,62	M	B
13965	13:54	7	4	11	22	2,3	1592,5	8,6	1,46	1,76850079	177	14,64	M	B
13965	14:05	7	4	11	22,5	2,3	1600	8,6	1,36	1,64454045	163	13,48	M	B
13965	14:09	7	4	11	23	2,3	1608	8,8	1,27	1,49536178	183	15,48	M	B
13965	14:17	7	4	11	23,5	2,3	1619,5	6,9	1,15	1,73375279	459	30,45	M	B
13965	14:22	7	4	11	24	2,3	1631	7,3	1,05	1,50218992	456	32,01	M	B
13965	14:28	7	4	11	24,5	2,3	1631	8	1,05	1,3707483	336	25,85	M	B
13965	14:35	7	4	11	25	2,3	1631	8,3	1,05	1,32120318	239	19,07	M	B

Colada	Hora	No de Cazuela	No. Coladas Tapón	No. Coladas Cazuela	h (cm) Altura de Escoria	H (cm) Altura del acero	Temp. del acero	DeltaP (Bar)	Coficiente de Resistencia (H y T)	Coficiente de Resistencia (H, T y P)	Flujo del Gas de Insuflado (NL/mi <sub>n</sub> )	IFE (F y P)	Diámet. del Ojo (MP, P, M, G, MG)	Agitación (M, R, B, A, MA)
13967	01:25	7	0	12	50	2,25	1552	9,2	2,41	2,72735476	120	10,62	M	B
13967	01:30	7	0	12	50	2,25	1551,2	8,8	2,45	2,89051891	200	16,92	M	B
13967	01:41	7	0	12	50	2,25	1550,4	8,7	2,48	2,9644923	280	23,42	M	A
13967	01:46	7	0	12	50	2,25	1549,6	8,7	2,51	3,00639325	279	23,34	G	A
13967	02:05	7	0	12	12	2,25	1549	8,7	2,54	3,0386046	280	23,42	MG	MA
13967	02:07	7	0	12	13,23	2,25	1554	9,8	2,33	2,47642717	63	5,94	M	B
13967	02:10	7	0	12	14,46	2,25	1559	9,3	2,16	2,41187384	97	8,67	G	A
13967	02:13	7	0	12	15,69	2,25	1564	9	2,00	2,31675769	115	9,95	G	A
13967	02:21	7	0	12	16,92	2,25	1566	9,2	1,95	2,20430042	122	10,79	G	A
13967	02:26	7	0	12	18,15	2,25	1581	9,6	1,62	1,75237709	83	7,66	M	B
13967	02:27	7	0	12	19,38	2,25	1596	9,4	1,38	1,52903136	97	8,77	G	A
13967	02:35	7	0	12	20,61	2,25	1611	9	1,21	1,39398132	142	12,29	G	A
13967	02:44	7	0	12	21,84	2,25	1620	9,2	1,12	1,26703883	118	10,44	MP	B
13967	02:47	7	0	12	23,07	2,25	1626	9,2	1,07	1,20987918	137	12,12	MP	B
13967	02:55	7	0	12	24,3	2,25	1642	9,9	0,96	1,00359851	59	5,62	MP	B
13967	03:04	7	0	12	25,53	2,25	1631	10,1	1,03	1,06213816	59	5,73	MP	B
13967	03:17	7	0	12	26,76	2,25	1624	10	1,09	1,13008257	59	5,67	M	B
13967	03:22	7	0	12	27,99	2,25	1624	9,2	1,09	1,22835062	120	10,62	M	B
13967	03:25	7	0	12	28	2,25	1628	9,2	1,05	1,19195504	122	10,79	G	B
13968	03:56	9	0	28	14	2,3	1524	9,2	4,69	5,30612245	120	10,62	MP	B
13968	03:59	9	0	28	14,57	2,3	1528	9,3	4,16	4,64917396	99	8,85	MP	B
13968	04:02	9	0	28	15,14	2,3	1532	9,5	3,73	4,08449696	80	7,31	MP	B
13968	04:06	9	0	28	15,71	2,3	1536	10,1	3,38	3,48447185	59	5,73	MP	B
13968	04:07	9	0	28	16,28	2,3	1540	10,1	3,10	3,18792105	59	5,73	M	B
13968	04:11	9	0	28	16,85	2,3	1544	10,1	2,85	2,93788803	59	5,73	M	A
13968	04:16	9	0	28	17,42	2,3	1548	10,4	2,65	2,64564007	38	3,80	M	B
13968	04:17	9	0	28	17,99	2,3	1552	10,4	2,47	2,46627465	40	4,00	M	B
13968	04:24	9	0	28	18,56	2,3	1554	9,3	2,39	2,66755883	99	8,85	P	A
13968	04:24	9	0	28	19,13	2,3	1565	9,3	2,02	2,26001512	99	8,85	MP	B
13968	04:27	9	0	28	19,7	2,3	1576	9,1	1,75	2,00358284	160	14,00	M	A
13968	04:34	9	0	28	20,27	2,3	1587	9,1	1,55	1,76912102	179	15,66	M	A
13968	04:48	9	0	28	20,84	2,3	1598	9,2	1,39	1,56656948	182	16,10	M	A
13968	04:58	9	0	28	21,41	2,3	1612	9,2	1,22	1,38226719	197	17,43	M	A
13968	05:05	9	0	28	22	2,3	1626	9,1	1,09	1,25035621	197	17,24	M	B
13969	06:01	7	1	13	10	2,3	1556	9,1	2,31	2,63964089	117	10,24	P	A
13969	06:04	7	1	13	11,25	2,3	1560,8	9,1	2,15	2,45276366	118	10,33	P	A
13969	06:06	7	1	13	12,5	2,3	1565,6	9,1	2,00	2,29059747	117	10,24	P	B
13969	06:11	7	1	13	13,75	2,3	1570,4	9,7	1,88	2,01564523	77	7,18	M	B
13969	06:19	7	1	13	15	2,3	1575,2	9,3	1,77	1,97957529	102	9,12	M	A
13969	06:29	7	1	13	16,25	2,3	1580	9,2	1,67	1,89068731	99	8,76	G	A
13969	06:32	7	1	13	17,5	2,3	1591	8,4	1,48	1,83832133	219	17,69	G	A
13969	06:36	7	1	13	18,75	2,3	1602	8,7	1,33	1,59580947	197	16,48	G	A
13969	06:46	7	1	13	20	2,3	1613	8,9	1,21	1,4169533	200	17,12	P	A

Nota: El Diámetro del Ojo Metálico es según la observación del operador clasificándolo en: **Muy Pequeño (MP)**, **Pequeño (P)**, **Mediano (M)**, **Grande (G)** y **Muy Grande (MG)**

El estado de la Agitación es según la observación del operador clasificándolo en: **Mala (M)**, **Regular (R)**, **Buena (B)**, **Alta (A)** y **Muy Alta (MA)**

Anexo 2

Sistema Difuso Altura de la Escoria

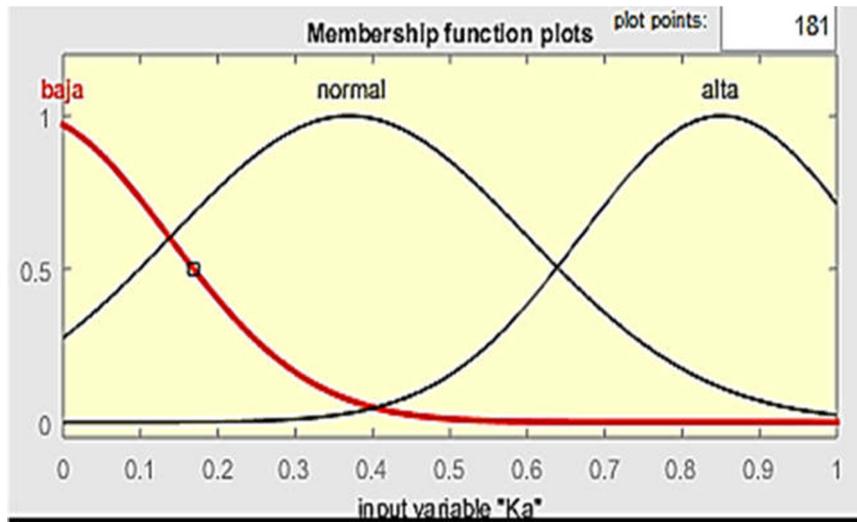


FIGURA A2.1 DISTRIBUCIÓN DE LOS SUBCONJUNTOS BORROSOS DE KA

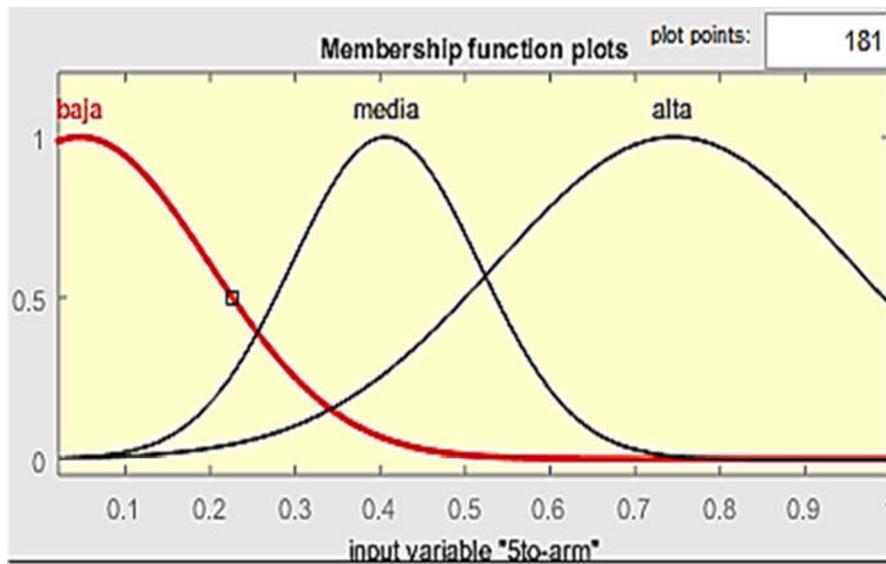


FIGURA A2.2 DISTRIBUCIÓN DE LOS SUBCONJUNTOS BORROSOS DEL PROMEDIO DEL QUINTO ARMÓNICO DE CORRIENTE

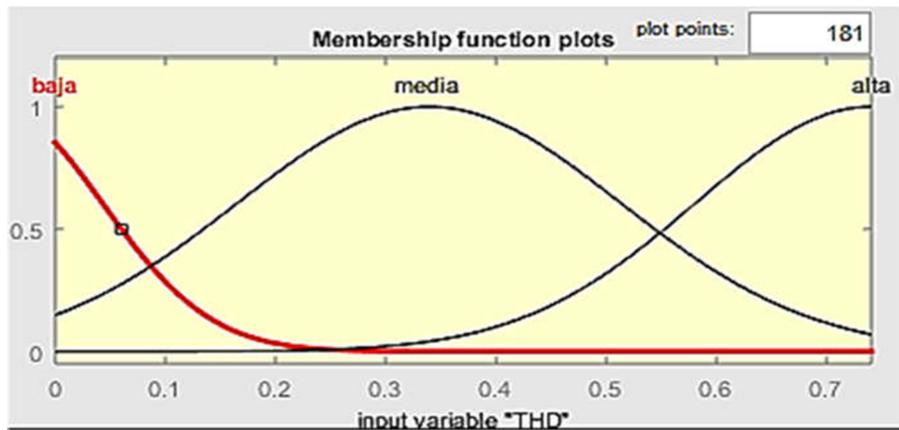


FIGURA A2.3 DISTRIBUCIÓN DE LOS SUBCONJUNTOS BORROSOS DE THD

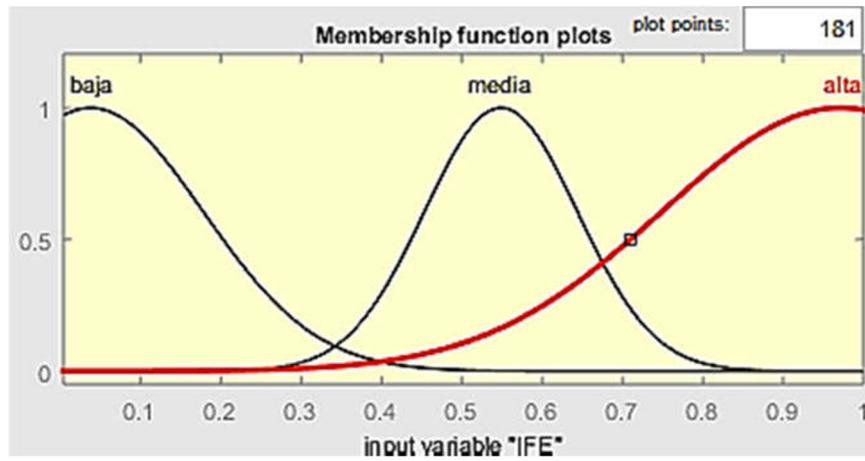


FIGURA A2.4 DISTRIBUCIÓN DE LOS SUBCONJUNTOS BORROSOS DE IFE

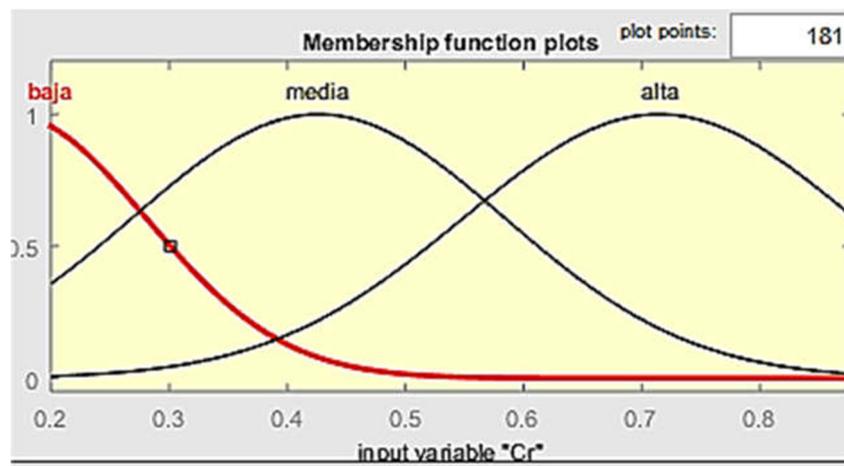


FIGURA A2.5 DISTRIBUCIÓN DE LOS SUBCONJUNTOS BORROSOS DE COEFICIENTE DE RESISTENCIA

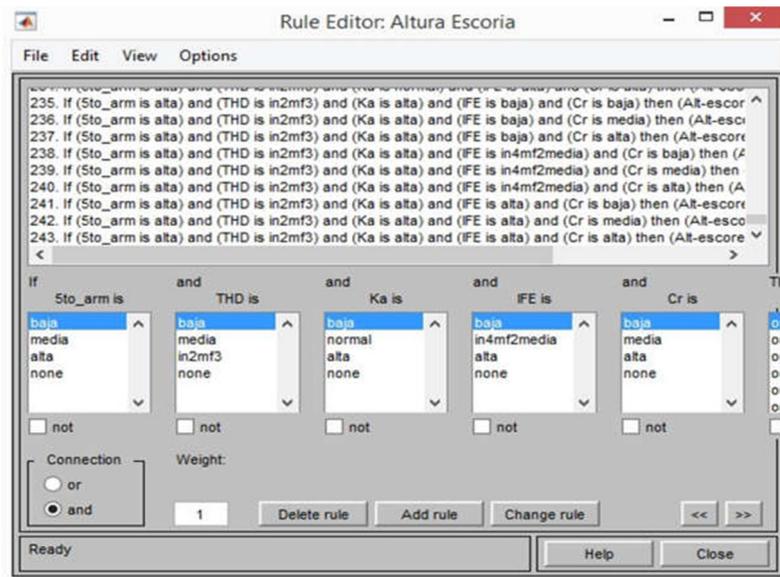


FIGURA A2.6 BASE DE REGLAS FIS ALTURA DE LA ESCORIA

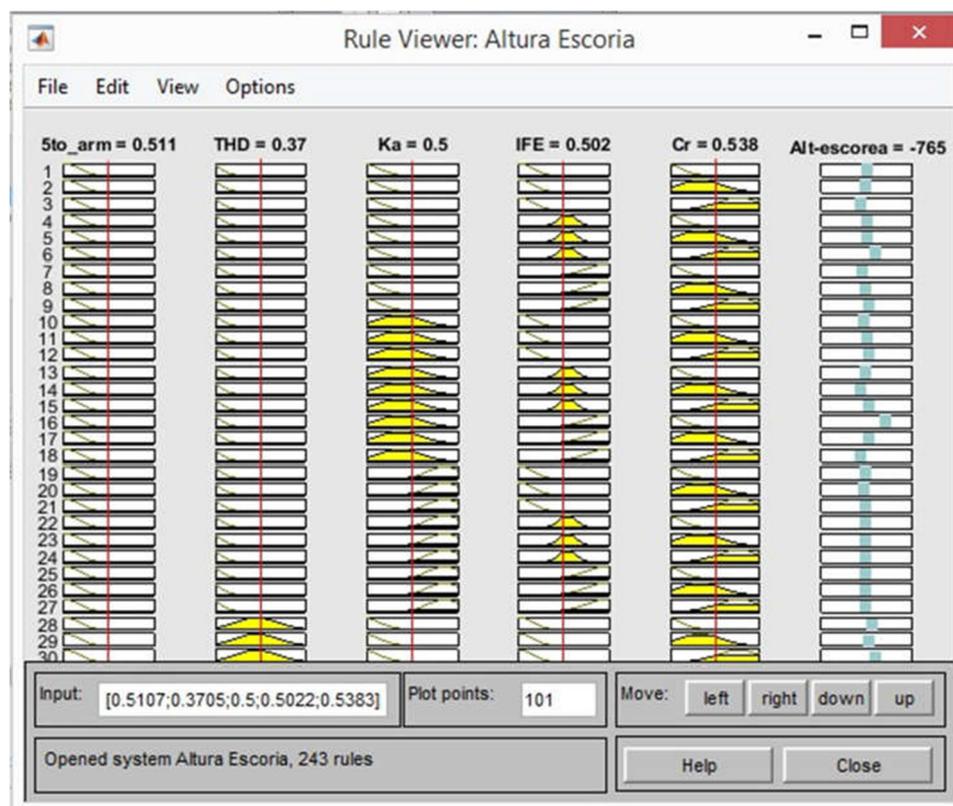


FIGURA A2.7 VISUALIZADOR DE REGLAS DEL SISTEMA DIFUSO CORRECCIÓN FLUJO DESEADO.

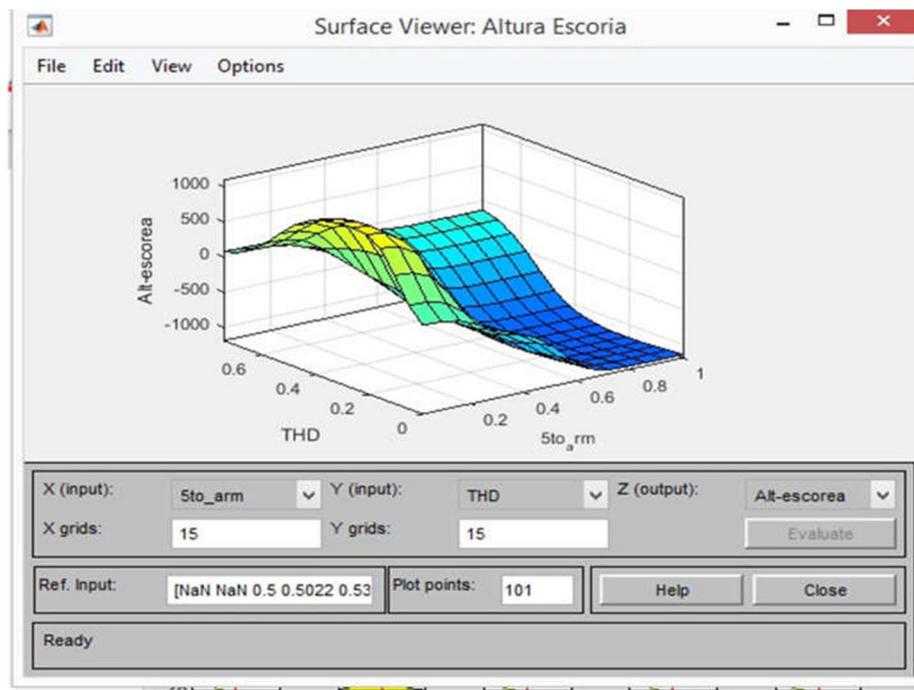


FIGURA A2.8 SALIDA DEL CONTROLADOR FUZZY EN FUNCIÓN DE LAS VARIABLES DE ENTRADAS.

Anexo 3  
 Sistema Difuso Estado Agitación

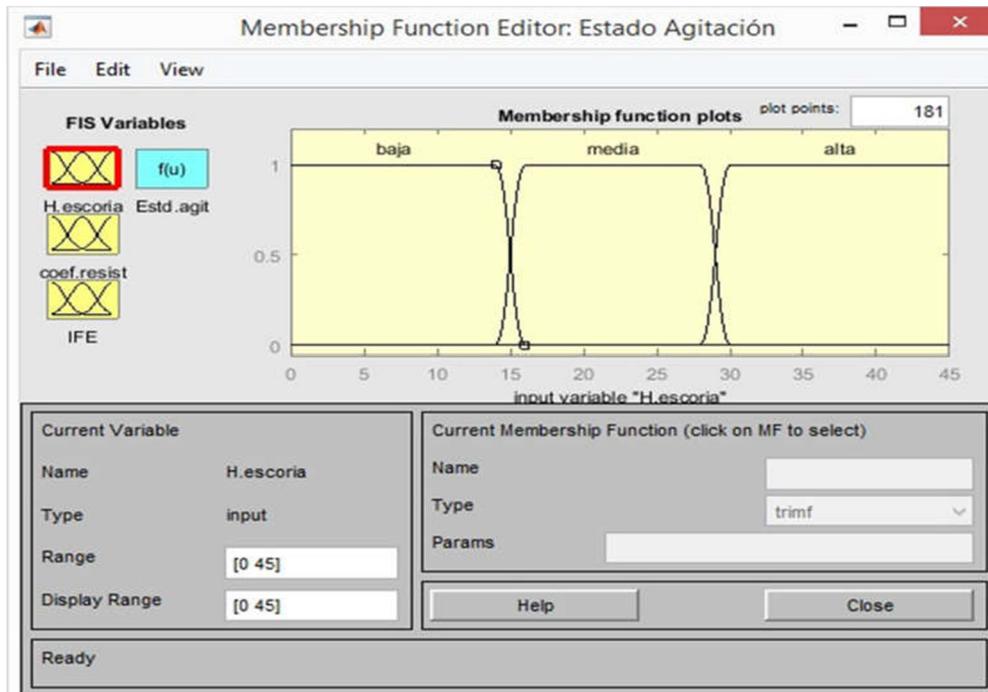


FIGURA A3.1 VARIABLE DE ENTRADA ALTURA DE LA ESCORIA.

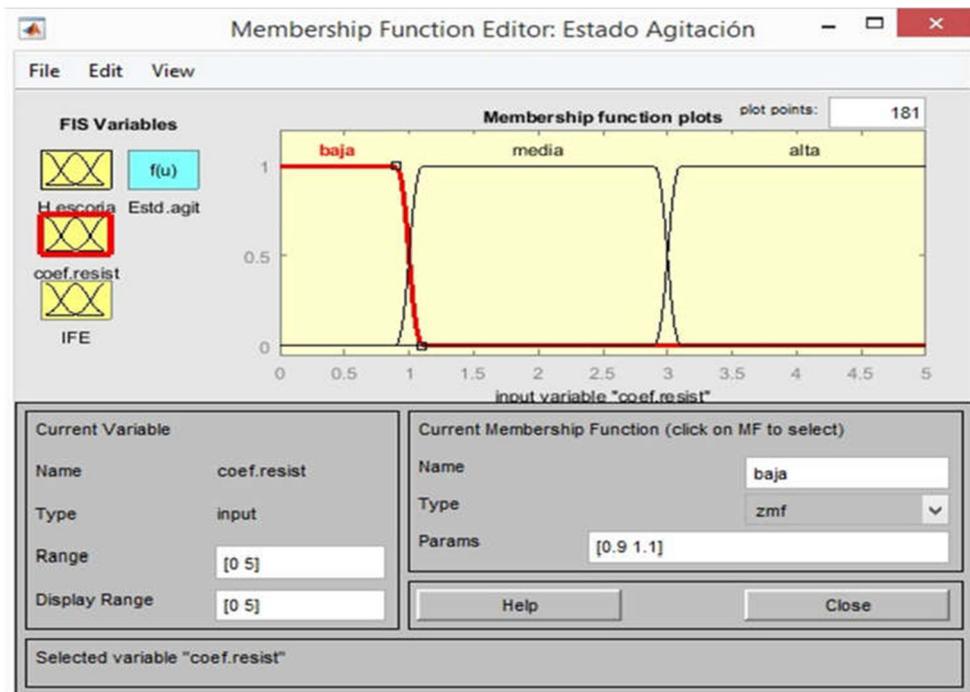


FIGURA A3.2 VARIABLE DE ENTRADA COEFICIENTE DE RESISTENCIA (COEFD R).

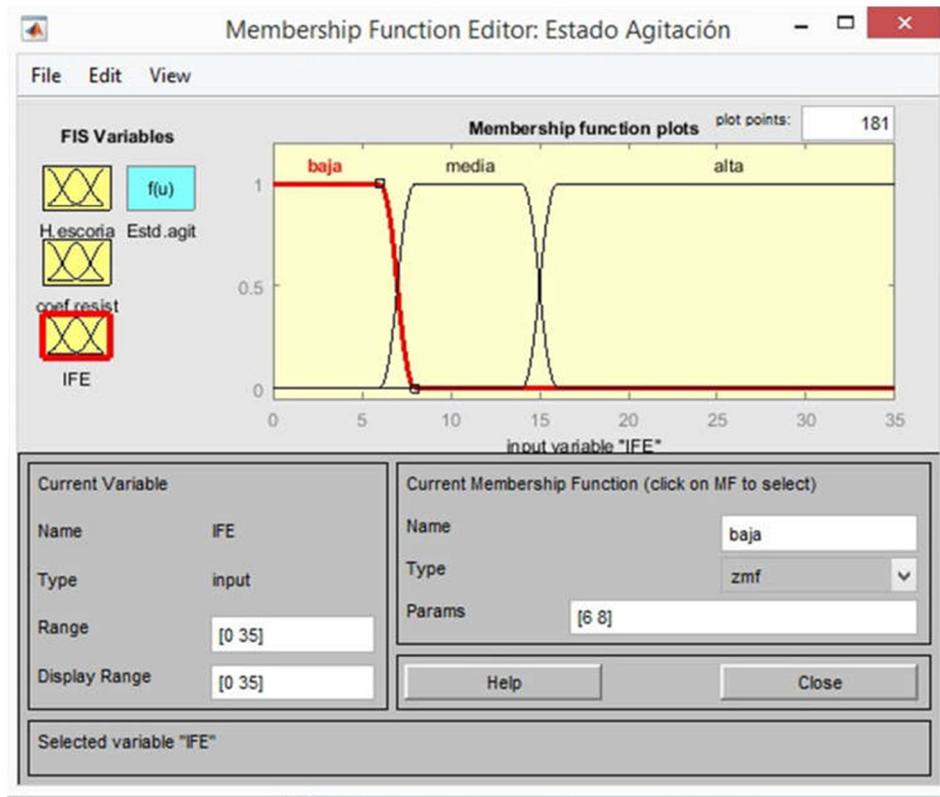


FIGURA A3.3 VARIABLE DE ENTRADA ÍNDICE DE FLUJO EFECTIVO (IFE).

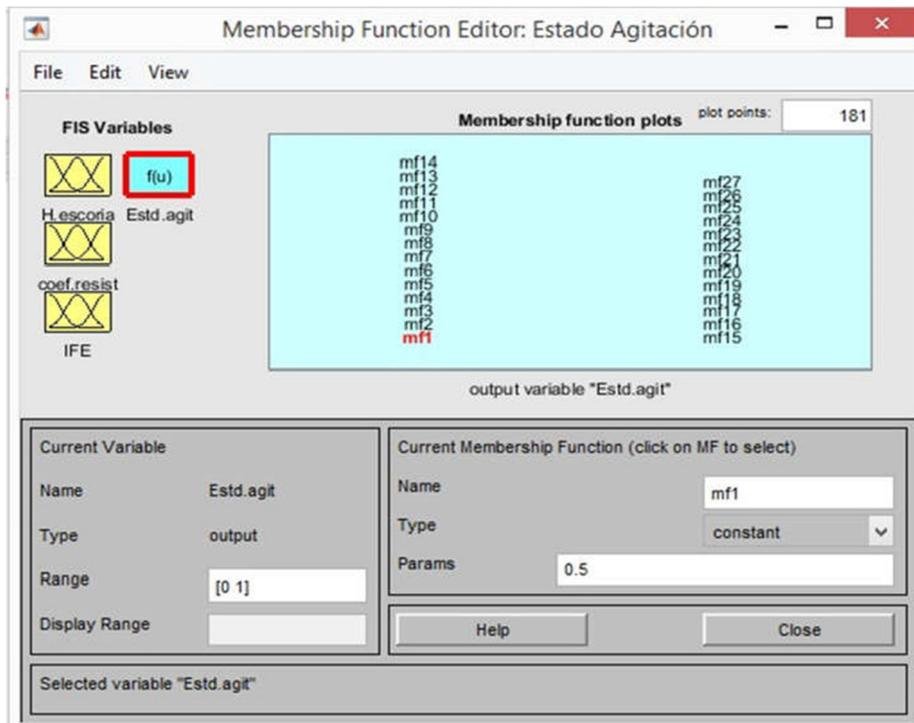


FIGURA A3.4 VARIABLE DE SALIDA ESTADO DE AGITACIÓN.

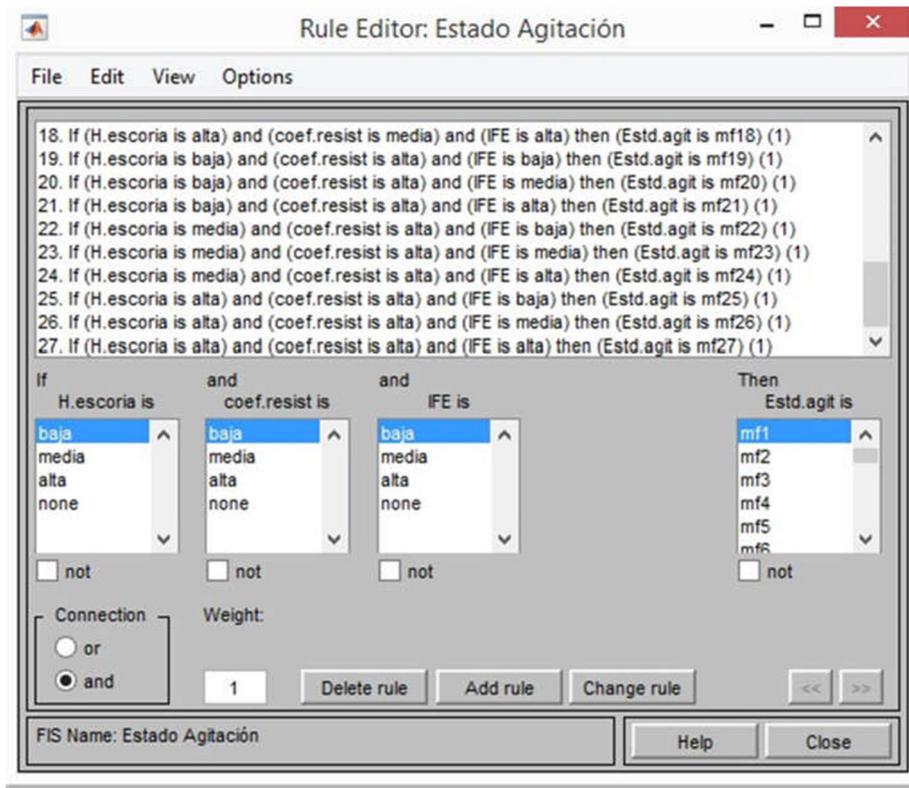


FIGURA A3.5 BASE DE REGLAS FIS ESTADO DE AGITACIÓN.



FIGURA A3.6 VISUALIZADOR DE REGLAS DEL SISTEMA DIFUSO.

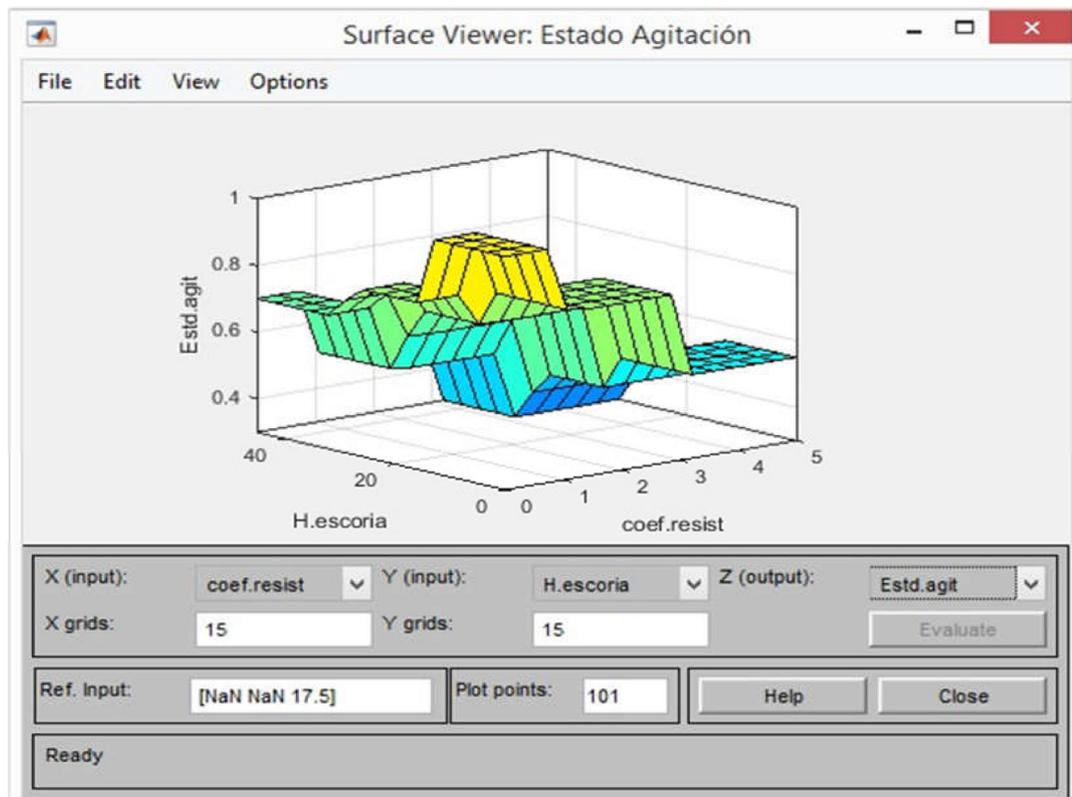


FIGURA A3.7 SALIDA DEL CONTROLADOR BORROSO EN FUNCIÓN DE LAS VARIABLES DE ENTRADAS

## Anexo 4

### Sistema Difuso Flujo Deseado

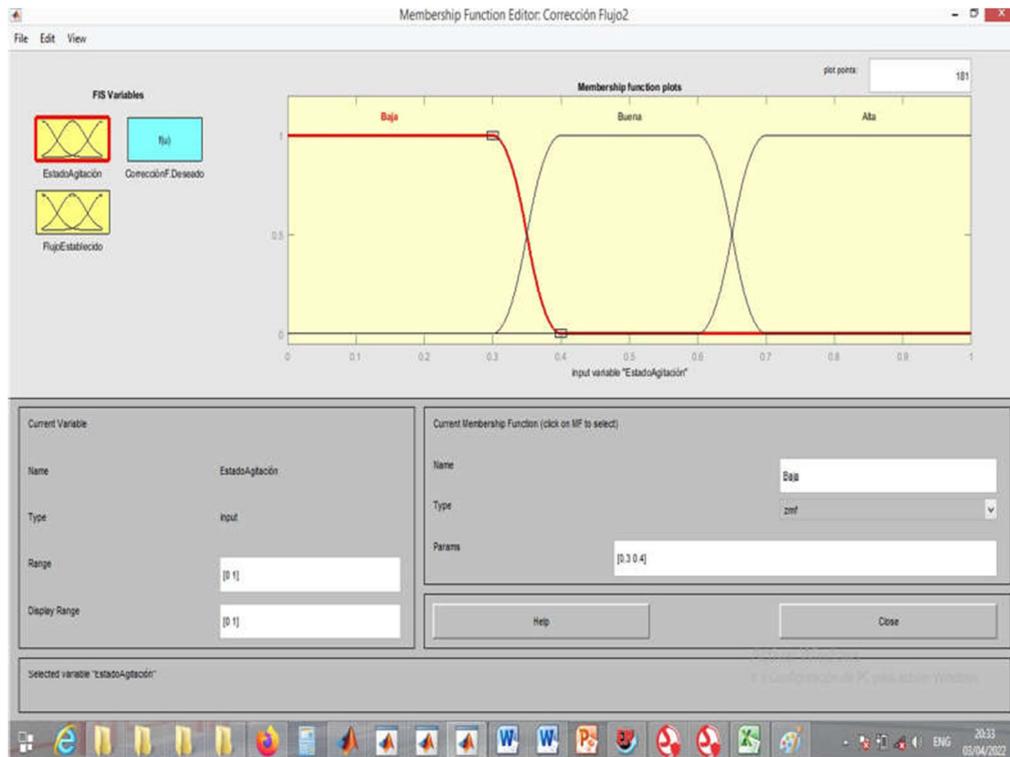


FIGURA A4.1 VARIABLE DE ENTRADA ESTADO DE LA AGITACIÓN.

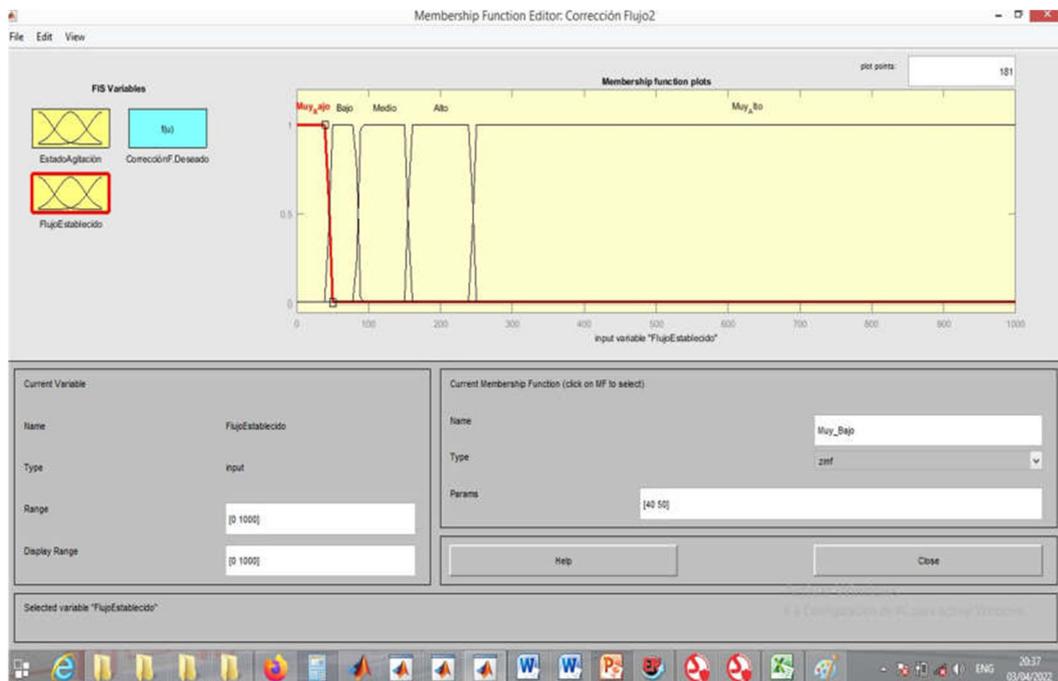


FIGURA A4.2 VARIABLE DE ENTRADA FLUJO DESEADO.

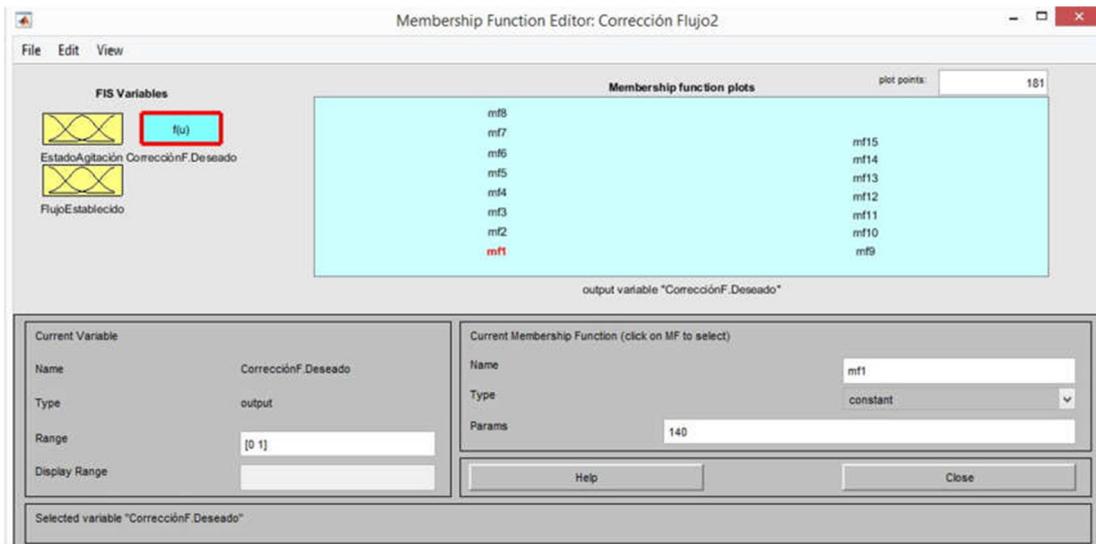


FIGURA A4.3 VARIABLE DE SALIDA CORRECCIÓN FLUJO DESEADO.

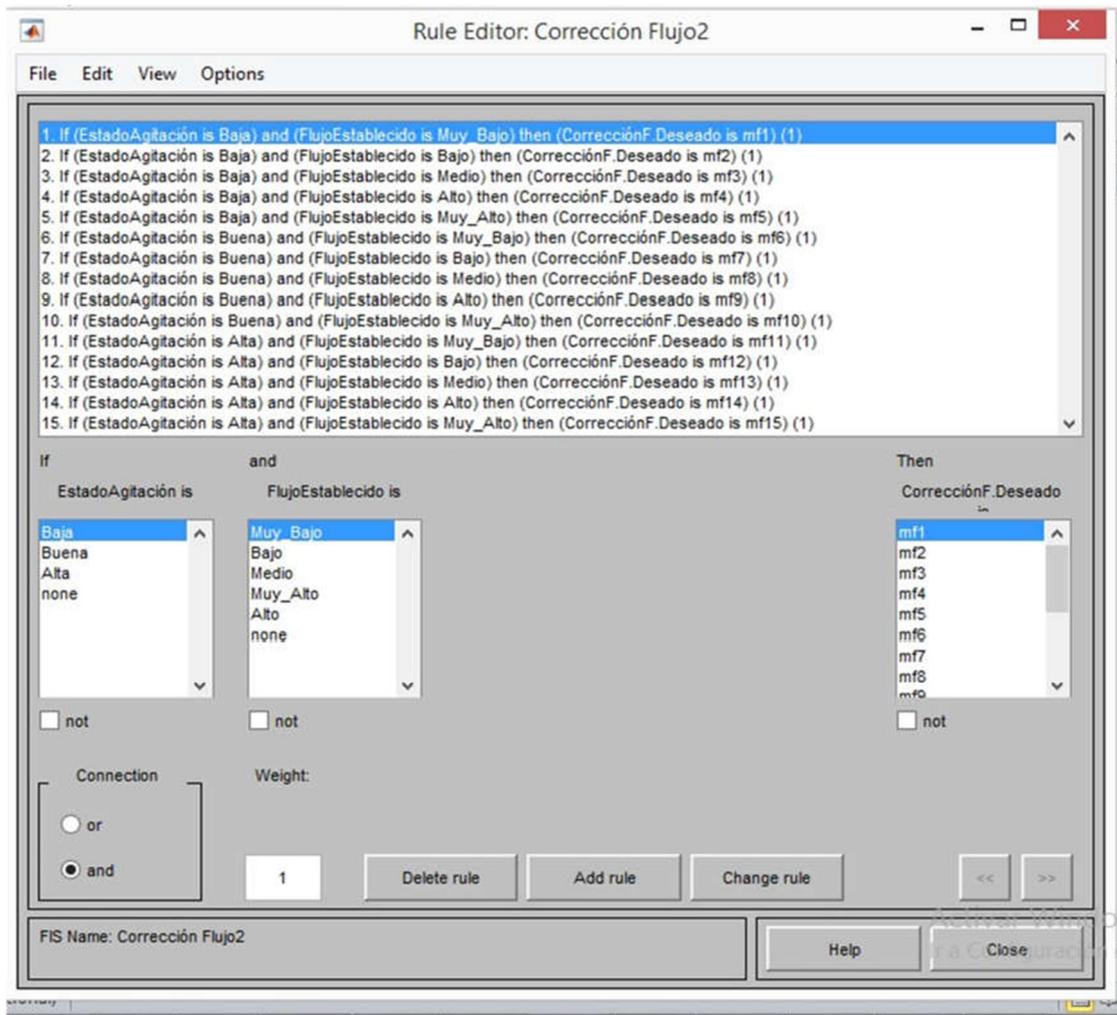


FIGURA A4.4 BASE DE REGLAS FIS CORRECCIÓN DEL FLUJO DESEADO.

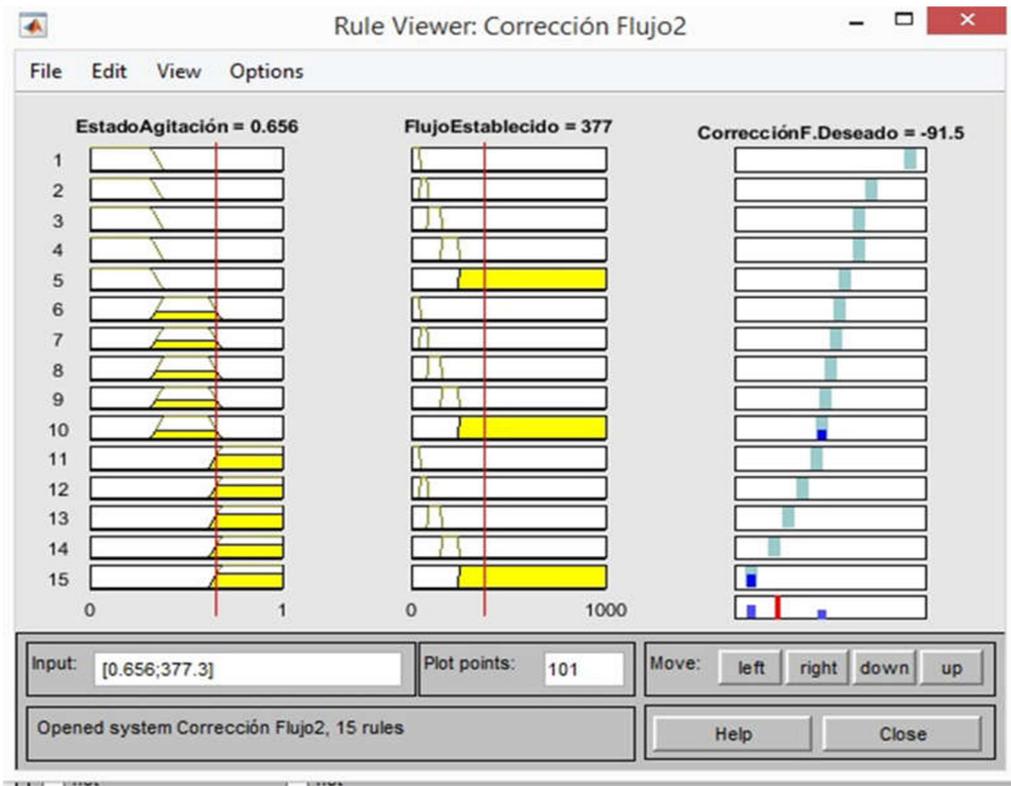


FIGURA A4.5 VISUALIZADOR DE REGLAS DEL SISTEMA DIFUSO CORRECCIÓN FLUJO DESEADO.

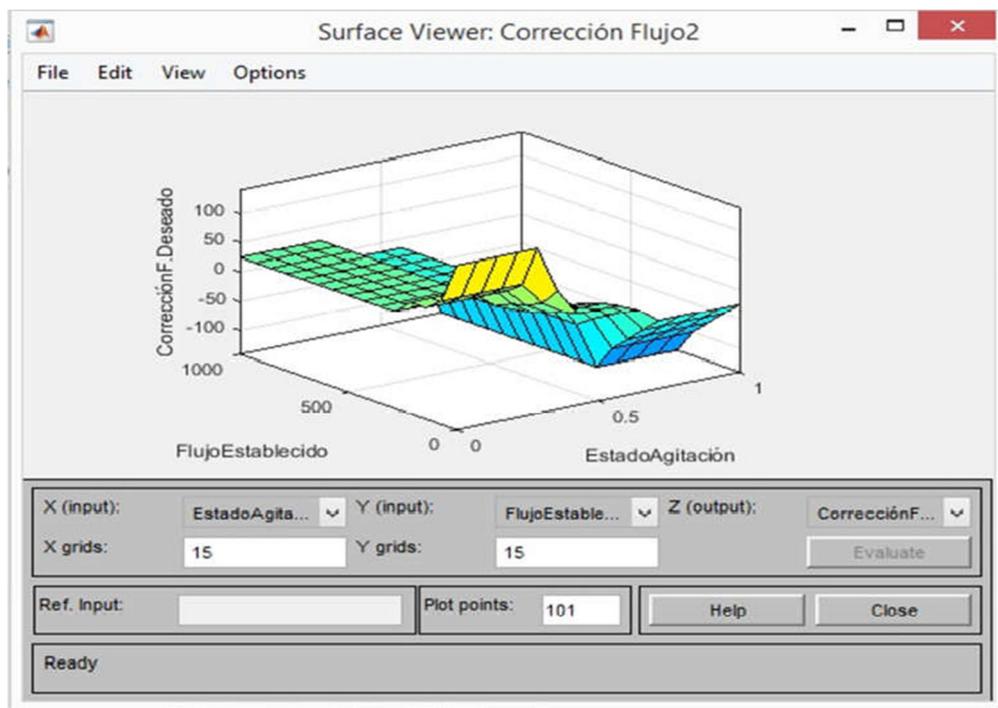


FIGURA A4.6 SALIDA DEL CONTROLADOR BORROSO EN FUNCIÓN DE LAS VARIABLES DE ENTRADAS.