



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

Autor: Carlos Alberto Díaz Ferrer

Tutor: MSc. José Antonio Pulles Boudet

MSc. Julio Fong Barrio

Santiago de Cuba

2022



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

Título: Diseño del sistema de control de extracción de los gases en el Horno de Arco Eléctrico de la Acería de la Empresa ACINOX Las Tunas.

Autor: Carlos Alberto Díaz Ferrer

Tutor: MSc. José Antonio Pulles Boudet

MSc. Julio Fong Barrios

Pensamientos

“Me parece haber sido sólo un niño jugando en la orilla del mar, divirtiéndose y buscando una piedra más lisa o una concha más bonita de lo normal, mientras el gran océano de la verdad yacía ante mis ojos con todo por descubrir”

Resumen

La dinámica innovadora no se ha detenido y continúan apareciendo, año tras año, nuevos desarrollos, tanto desde los proveedores de equipamiento, tecnología e insumos como desde las mismas acerías.

El diseño de un sistema de extracción de gases requiere la consideración de varios pasos, incluida la contención de los gases de extracción del horno, los procesos de reacción que tienen lugar en el horno y los procesos a través del propio sistema.

El sistema de extracción de los gases juega un papel fundamental en la operación del HAE y la presión en el interior del HAE se controla mediante el sistema de extracción primario. El control del HAE se ve enriquecido en la Empresa ACINOX Las Tunas con lo aportado por este trabajo, los experimentos nos permiten ganar en conocimiento sobre el funcionamiento actual del HAE.

Consecuentemente, el sistema de extracción de los gases puede ser adaptado a períodos diferentes de fundición para optimizar en primer lugar, disminuir la extracción innecesaria de energía presente en los gases; segundo, mantener niveles seguros de CO y tercero, cuidar los filtros de mangas de altas temperaturas.

La lógica fuzzy enriquece nuestra investigación y resulta una técnica atractiva para lograr los objetivos de control, con el diseño de un controlador borroso se obtienen resultados a nivel de simulación que cumplen con los requisitos de mantener rangos óptimos de las variables, temperatura y presión total; aunque existen recomendaciones que permiten un control más eficiente se evidencia la naturaleza de la necesidad de controlar la extracción de los gases de escape.

Abstract

The innovative dynamic has not stopped and new developments continue to appear, year after year, both from equipment, technology and input suppliers and from the steel mills themselves.

Designing an exhaust system requires consideration of several steps, including the containment of the furnace exhaust gases, the reaction processes that take place in the furnace, and the processes through the system itself.

The gas extraction system plays a fundamental role in the operation of the HAE and the pressure inside the HAE is controlled by the primary extraction system. The control of the HAE is enriched in the Acinox Las Tunas Company with what is contributed by this investigation; the experiments allow us to gain knowledge about the current functioning of the HAE.

Consequently, the gas extraction system can be adapted to different smelting periods to optimize, first of all, reduce the unnecessary extraction of energy present in the gases; second, maintain safe levels of CO and third, take care of high-temperature bag filters.

Fuzzy logic enriches our research and is an attractive technique to achieve control objectives. With the design of a fuzzy controller, simulation-level results are obtained that meet the requirements of maintaining optimal ranges of variables, temperature and total pressure; Although there are recommendations that allow a more efficient control, the nature of the need to control the extraction of exhaust gases is evident.

Índice

Introducción.....	1
Capítulo 1. Fundamentos teóricos del control dinámico de los gases de extracción del HAE.....	7
Introducción.....	7
1.1 Caracterización gnoseológica de hornos de arco eléctrico y el sistema de extracción de los gases	7
1.1.2. Caracterización	9
1.2 Caracterización histórica de hornos de arco eléctrico y control dinámico de los gases	10
1.3 Caracterización del estado actual de hornos de arco eléctrico y control de presión.....	12
1.4 Diseño y estrategia del sistema de control dinámico de los gases de extracción del HAE.....	21
Conclusiones.....	27
2 Diseño de un controlador borroso para control dinámico de los gases de extracción en el interior del HAE.....	28
Introducción.....	28
2.1 Fundamentos teóricos de la propuesta.....	28
2.2 DISEÑO DE EXPERIMENTOS.....	30
2.2.1. DETERMINACIÓN DE LAS VARIABLES Y MANGITUDES PARA CONTROL DINÁMICO DE LOS GASES EN EL HAE.....	30
2.2.2. RECOLECCIÓN DE LOS DATOS EXPERIMENTALES	34
2.3. ESQUEMA PROPUESTO.....	37
2.3.1 MODELADO DEL SISTEMA DE INFERENCIA BORROSA ABERTURA DESLIZANTE.....	37
2.3.1 MODELADO DEL SISTEMA DÁMPER.....	39

2.4. RESULTADOS A ESCALA DE SIMULACIÓN DEL SISTEMA PROPUESTO.	40
2.3 Valoración de los resultados alcanzados	45
2.3.1 Análisis valorativo de los aspectos económicos y medioambientales.	46
Conclusiones	47
Conclusiones.....	48
Recomendaciones	49
Bibliografía	50
Anexos	52
Anexo1	52
Anexo2	53
Anexo 3	65

Lista de símbolos, términos especiales y abreviaturas no normalizadas

Notación	Descripción
HAE	Horno de Arco Eléctrico
CO	Monóxido de carbono
TSK	Takagi-SugenoKang
EFSOP[®]	Sistema de optimización experto del proceso del horno
LINDARC[™]	Sistema de análisis de extracción basado en láser
MPC	Control Predictivo
MIMO	Múltiple Entrada Múltiple Salida

INTRODUCCIÓN

Mientras otros procesos de aceración han desaparecido, los hornos eléctricos de arco pasaron por cambios extraordinarios que han permitido que sean la herramienta elegida para producir casi una tercera parte del acero en el mundo. La dinámica innovadora no se ha detenido y continúan apareciendo, año tras año, nuevos desarrollos, tanto desde los proveedores de equipamiento, tecnología e insumos como desde las mismas acerías.[1]

En el marco del desarrollo de la 4ta Revolución Industrial la Industria del Acero se encuentra en constante crecimiento y gracias a la implementación de sistemas automáticos buscan la solución a sus problemas, para de esta manera aumentar al máximo la eficiencia de sus operaciones y mejorar el servicio al cliente (alta calidad y bajo costo para mantener competitividad).[1, 2]

El horno puede ser catalogado como un recipiente sometido a presión, lo que significa un recipiente que contiene un fluido el cual tiene una diferencia de presión en su interior con respecto al exterior. En el caso del horno, la presión será menor a la atmosférica por lo cual se evaluará como tanque sometido a presión externa, o de vacío, sin sacrificar los cálculos de presión interna que pueden ocurrir en una situación no deseada.[3] Los avances tecnológicos muestran un dinamismo extraordinario, que en un período de pocas décadas permitió una disminución espectacular de los consumos específicos de energía, de refractarios y de electrodos, así como un importante acortamiento de los tiempos de colada a colada, con una gran versatilidad en las materias primas que se pueden utilizar para elaborar todos los productos que es posible ubicar en el mercado. [1]

Existen diversas tecnologías para el análisis en línea de los gases de salida del horno. Una importante cantidad de hornos tienen instalado alguno de estos sistemas, que proporcionan información al operador y al ingeniero de procesos para interpretar diferentes situaciones operativas. Los datos obtenidos pueden permitir, por ejemplo, bajar el consumo de gas natural o incrementar el oxígeno para mejorar el balance energético en los períodos en que hay alto porcentaje de CO y H₂, ya que se pierde energía en el gas de escape. En algunos casos se pueden detectar perforaciones de paneles. [1]Esto plantea un desafío al desarrollo de tecnologías en este campo, para aumentar la eficiencia energética del horno eléctrico, incrementar su productividad, disminuir su costo operativo y mejorar su performance ambiental [1-2].

En el pasado no ha habido suficiente colaboración del operador del horno con el diseñador del sistema de gas residual. Como resultado de ello, ha sido difícil proporcionar sistemas que se ajusten a las operaciones dentro del local de fundición. Sin una clara comprensión de las operaciones del horno, no es posible diseñar un sistema de extracción de gas apropiado. Esencialmente, el diseño del sistema de extracción de gas implica un balance detallado de masa y energía alrededor del horno de fusión para proporcionar la base de la cantidad de gas y el contenido de calor que sale del horno de fusión. Hay una variedad de factores de proceso del horno que influyen en la tasa máxima de flujo de gas residual y la carga máxima de calor contenida en el gas residual.

Entre esos factores figuran el peso de la carga, la mezcla de chatarra (su aceite, material combustible y contenido de humedad), la potencia del horno y el tiempo de encendido, el tiempo de "tap-to-tap", las aberturas del horno y la infiltración de aire asociada (puerta de escoria, puertos de electrodos, anillo de techo, puertos auxiliares), las tasas del quemador de oxicomcombustible y de la lanza de oxígeno y la duración del uso, las tasas de inyección de carbono y el uso de fuentes alternativas de hierro y la tasa de

alimentación. Tanto la cantidad de gas como su contenido de calor afectan al tamaño del sistema de extracción primario. Cabe señalar que el ventilador del sistema es un dispositivo de volumen constante. El ventilador es capaz de mover una mayor masa de gas residual si éste es más frío (cuanto más frío es el gas residual, menor es su volumen). Al mismo tiempo, el motor del ventilador tiene una potencia limitada. Por lo tanto, para proporcionar la máxima evacuación para una configuración de sistema de extracción primaria dada, se desea enfriar el gas residual tanto como sea posible, pero al mismo tiempo asegurar que nos mantengamos dentro de los valores de corriente del extractor.

En [2-3] utilizaron la información obtenida con ese análisis y proveniente de otros sensores para poder predecir temperatura y carbono finales de manera equivalente al control dinámico que se realiza en los convertidores al oxígeno.

El sistema de extracción de los gases juega un papel fundamental en la operación del HAE y la presión en el interior del HAE está estrechamente relacionada con el sistema de extracción de gases primario y el secundario [2],[4]. El control del HAE se ve enriquecido en la Empresa Acinox Las Tunas con lo aportado por este trabajo, los experimentos nos permiten ganar en conocimiento sobre el funcionamiento actual del HAE [1-2-3-4].

Consecuentemente, el sistema de extracción de los gases puede ser adaptado a períodos diferentes de fundición para optimizar en primer lugar, rendimiento de kW/h del proceso fundente; segundo, la oxidación de Cr por el control de presión parcial de CO y tercero, la distribución homogénea de la temperatura en el HAE.[5]

El control de la presión (positiva, pero cerca de la atmosférica) debe lograr la máxima eficiencia energética, regular el contenido de CO y la temperatura de los gases de extracción para cuidar los filtros.[6]El sistema

de extracción de gases permite la salida de los gases primarios del Horno de Arco Eléctrico (HAE) a través de la abertura deslizante, que son regulados por el dámper del HAE; así como de los secundarios que son captados y regulados por las campanas colocadas debajo del techo de la acería. El propósito de del sistema primario de extracción es extraer de los gases emitidos por el HAE, y también influye en el proceso controlando la presión del mismo. [5]

Este trabajo investiga las variables controladas, potencia del motor de extracción y el dámper de extracción y cómo influyen en el proceso del HAE; estas dos variables manipuladas son usadas para controlar la presión en el HAE, la temperatura y la composición de los gases, más específicamente el contenido de CO. [5] Según [2-3-5], la presión dentro del HAE debe estar en un rango de 0-5 mmH₂O, con temperaturas que pueden alcanzar los 1600°C.

Los sistemas borrosos TSK constituyen una poderosa herramienta para el modelado de sistemas complejos[7]. Con precedentes en el uso de lógica fuzzy en un sistema de control de presión en el interior de HAE, específicamente [2], se demuestran las ventajas sobre las técnicas convencionales.

Al no existir una coordinación entre la extracción de los gases y el proceso se produce una succión en exceso de los gases, lo que afecta la eficiencia del horno, considerando que el calor de los gases cumple la función de aumentar la temperatura de la carga metálica para disminuir el tiempo de fusión y que la colada pueda ser preparada en menor tiempo.

La inexistencia de un control de la presión en el interior del HAE de la Acería de la Empresa Acinox Las Tunas hace que se plantee como **problema de la investigación** la ineficiencia en el Horno de Arco Eléctrico causado por pérdidas de presión en el interior del HAE y como **objeto de la investigación** el Horno de Arco Eléctrico.

Como **campo de acción** el control de presión en el interior del Horno de Arco Eléctrico, como **objetivo** de dicha investigación, realizar el diseño del sistema de control de presión del Horno de Arco Eléctrico de la Acería de la Empresa de Acinox Las Tunas.

Del análisis efectuado se llega a la siguiente hipótesis: Si se diseña el control de presión del Horno de Arco Eléctrico e tiene una herramienta para obtener mayor eficiencia energética, una reducción del costo del producto terminado y la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero.

Tareas Investigativas:

1. Caracterizar desde el punto de vista histórico, gnoseológico y contextual del control de presión en Hornos de Arco Eléctrico.
2. Entrevistar a operadores, tecnólogos y buscar los valores recomendables para la fabricación de acero, tanto de temperatura como de presión.
3. Estudiar y analizar cómo se medirá la presión y cual sensor brinda las mejores prestaciones.
4. Realizar el diseño del sistema de control de presión del horno de Arco Eléctrico.
5. Validar los resultados.

Aporte de la investigación y significación práctica.

Con el diseño de un sistema de control borroso de presión para el HAE en la empresa ACINOX Las Tunas se logrará incrementar la eficiencia del HAE, disminuir las emisiones de CO y disminuir con ello el costo ambiental y monetario del producto final.

Para la realización de esta tesis se emplearon métodos de investigación teóricos y empíricos. Entre los teóricos se inició con el método histórico-lógico realizando la revisión bibliográfica de los HAE y profundizando en los fundamentos teóricos del modelado y control de presión para aplicar el método hipotético-deductivo que permitió elaborar el marco teórico y la hipótesis de investigación. El método de análisis-síntesis se utilizó para analizar las dificultades presentes en los sistemas de extracción de gases de los HAE, permitiendo así, el estudio y solución del problema de control de la presión, también permitió analizar las ventajas y desventajas del método de la modelación que posibilitó obtener una representación de la planta.

Los métodos empíricos de observación, medición, encuesta, entrevista y experimentación permitieron observar el comportamiento e incidencia de las variables de interés. El método experimental, posibilitó la simulación en Matlab® para la comprobación y fundamentación de los resultados.

Los resultados expuestos en esta tesis han sido publicados en las referencias que aparecen los Anexos. El informe de esta investigación se organiza en introducción, desarrollo que contiene dos capítulos, las conclusiones, las referencias bibliográficas y los anexos. En el primer capítulo, se presentan los fundamentos teóricos del modelado y control de presión después de una amplia revisión bibliográfica dirigida a justificar el planteamiento de la hipótesis. En el capítulo dos se desarrolla el modelado del caso de estudio, el cual es empleado para el diseño y las simulaciones. La propuesta se somete a criterios de especialistas, se efectúa un análisis que demuestra su desempeño a escala de simulación.

Capítulo 1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS DEL CONTROL DINÁMICO DE LOS GASES DE EXTRACCIÓN DEL HAE

INTRODUCCIÓN

En este capítulo se desarrollan las características de los hornos de arco eléctrico y el control de presión a través del sistema de extracción de gases, tomando las experiencias adquiridas a través de los años y la importancia de controlar la atmósfera interior. Se caracterizan también los métodos fundamentales para el control de los HAE. Por tanto, se realiza un estudio del estado del arte de dichas temáticas, con vista a su utilización para el diseño de un sistema de control borroso, con las herramientas de Matlab®, para la simulación del sistema borroso propuesto y para el tratamiento de las variables medidas, todo lo anterior conlleva a la novedad de este estudio en nuestro país.

1.1 CARACTERIZACIÓN GNOSEOLÓGICA DE HORNOS DE ARCO ELÉCTRICO Y EL SISTEMA DE EXTRACCIÓN DE LOS GASES

Los HAE son ampliamente usados en la industria acerera y en la fundición de metales no ferrosos. Los HAE típicos funcionan en niveles de potencia de 10MW hasta 100MW.[8] Habitualmente, los HAE se fraccionan en tres partes fundamentales: la cámara, el crisol y el electrodo. En la cámara se desarrolla la fusión debido a la acción del electrodo sobre el material a fundir, este último denominado en su conjunto como carga; la cámara alberga el crisol y el electrodo. La cámara puede contener diversos accesorios para el control de la operación, entre ellos termopares, entradas y salidas de gases y otros dispositivos electromecánicos y de obtención de datos. El crisol funciona como el contenedor de la carga, debe soportar las temperaturas de fusión sin contaminar el baño fundido por transferencia de elementos sea por fusión localizada o por difusión. Usualmente los crisoles se fabrican de materiales refractarios que soportan altas temperaturas, cuando no pueden ser refrigerados; o de materiales de alta conductividad térmica cuando la refrigeración es posible. Los electrodos son los responsables de suministrar la

energía para la fusión y los más usados son de grafito y de aleaciones de tungsteno, este último como material termiónico no consumible.[9]

En [10], figura 1.1 detalla que el HAE funciona por ciclos y hace las siguientes operaciones:

- Carga del horno
- Fundición
- Refinado
- Desecoriado
- Vaciado
- Voltearlo

Las operaciones modernas logran hacer todo el ciclo en 60 minutos. Según [11], el horno actual incluye tres partes refrigeradas por agua: el techo, los paneles, y el ducto de extracción de gases. En [2, 6] plantean que el objetivo fundamental del sistema de extracción de los gases emitidos por la reacción que ocurre dentro del HAE, extraer gases peligrosos como el CO, y también filtrar el polvo. El sistema de extracción de gases tiene influencia en el proceso de confección del acero; influye en la presión del interior del HAE a través de la tasa de extracción de gas. En consecuencia, determina el grado de arrastre del aire, y por tanto el requisito de energía del proceso, así como el nitrógeno en el acero.

El sistema de extracción está dividido en primario y secundario como se muestra en la Figura 1.2,[12] la mayoría de los trabajos desarrollados en el área de investigación de los HAE van dirigidos al control del electrodo, en el presente trabajo nos damos a la tarea de conformar un lazo que brinde las garantías de mantener una presión óptima, previa consulta con los tecnólogos de la fábrica, pero según [2, 6] la presión debe ser negativa siempre cerca de la presión atmosférica.

El sistema primario de extracción de los gases está compuesto por la abertura deslizante que es un orificio desplazable que se encuentra en la parte superior de la tapa del HAE. El segundo elemento del sistema, el dámper, permite regular el flujo de los gases hacia un sistema de enfriamiento y de filtros de mangas; los gases deben llegar a una temperatura inferior de 120 °C a dichos filtros. El elemento final son unos ventiladores de 6KV que se encargan de extraer dichos gases y enviarlos a la atmósfera por una chimenea.

1.2 CARACTERIZACIÓN HISTÓRICA DE HORNOS DE ARCO ELÉCTRICO Y CONTROL DINÁMICO DE LOS GASES

En 1878 Sir Charles William Siemens en Inglaterra construyó y patentó el Horno de Arco Eléctrico para la fabricación de acero. Un horno eléctrico de arco utiliza electricidad y varios combustibles como el gas natural y el carbón para suministrar energía para calentar y derretir el material de carga. Varios otros materiales, como fundentes, cal, carbono y oxígeno, también se inyectan en el horno eléctrico de arco durante el ciclo de fusión. Un gran volumen de gases de escape se descarga del horno a >3000 °F durante la operación de fusión. Estos gases contienen productos de combustión incompleta, incluido el dióxido de carbono (CO₂), agua vapor (H₂O), monóxido de carbono (CO), hidrógeno (H₂) y otros hidrocarburos. También incluyen pequeñas cantidades de Partículas sólidas metálicas y no metálicas en varios tamaños.[14]

Para el año 1935, se incrementó el uso de la tecnología, según[2]para el 2004 un tercio de la fabricación mundial de aceros utilizaba HAE [15]y solo en EEUU el 50%; los HAE consumían el 1% de la energía generada en el mundo. Desde esa etapa los avances han ido creciendo; según [16] poco después desafiaron el problema del desgaste de los refractarios, dándose la tendencia a incrementar la potencia específica de trabajo para lograr aumentar la producción. La utilización de arcos cortos sumergidos en la escoria operando a un factor de potencia de 0,60 – 0,65 y a muy altas intensidades resolvió la situación.

En [16]se plantea que en los años 80 hubo de nuevo un aumento en la productividad fruto de ciertos avances como por ejemplo: la técnica de la escoria espumosa, que permite utilizar arcos más largos con mayor tensión y reducción de la intensidad.

Este cambio concibe que los hornos trabajen con un factor de potencia de 0,75 – 0,85, permitiendo el mejor aprovechamiento del transformador principal.

En [17] se han mejorado las técnicas de refrigeración, la regulación de la potencia en el arco y se han integrado de forma masiva los equipos de control automatizados.

La operación de un horno de arco eléctrico al fundir el acero no tiene un carácter lineal sino más bien intermitente en las diferentes etapas de preparación de una colada, el flujo de los gases varia constantemente sea por el ducto de extracción directa al horno por la chimenea superior de toda la planta, un mal funcionamiento del sistema de extracción de gases no solo genera problemas en la planta de gases sino también en los diferentes equipos eléctricos y mecánicos externos al horno, ya que se eleva la temperatura y aumenta las partículas del polvo en toda la planta.

En [18] aseguran que el aumento de la productividad está estrechamente relacionada con el incremento del uso de oxígeno en el horno, donde la energía de la reacción exotérmica reemplaza el alto consumo de la energía eléctrica de entrada. También, acorta los tiempos de funcionamiento y reduce la gran demanda del sistema de extracciones de gases.

En la década de 1990 se realizaron las primeras investigaciones del control de los gases de extracción, obligados mayormente por las legislaciones medioambientales, en [19] la investigación tenía como objetivo la tendencia a la baja de los límites de emisión de CO sin mencionar que el ambiente de trabajo con ciertos niveles de monóxido de carbono (por encima de 10000ppm) es nocivos para los obreros. En [18] demostraron que los aumentos de la productividad en el HAE están especialmente relacionados con las cantidades de oxígeno y la reacción exotérmica que se genera al oxidarse el carbón, el silicio y el hierro, reemplazando los aportes eléctricos, pero conduce a un mayor control de los gases de extracción.

Para investigar el uso de la variable gas de extracción en una estructura de control apropiada es necesario un modelo del proceso confiable, y en [20] derivaron un

modelo dinámico basado en balance de energía y masa del HAE, esto conlleva un notable esfuerzo matemático.

En [21] 1998 estuvo disponible un modelo adecuado que consta de 17 ecuaciones diferenciales lineales con las siguientes desventajas:

- Un gran número de variables manipuladas y controladas;
- las restricciones impuestas en las variables manipuladas;
- cambios en los objetivos de control o fallos del equipamiento.

1.3 CARACTERIZACIÓN DEL ESTADO ACTUAL DE HORNOS DE ARCO ELÉCTRICO Y CONTROL DE PRESIÓN

El balance de energía EAF indica que hasta aproximadamente el 35 % de la energía de entrada se pierde en la descarga de chatarra, los gases de extracción y el sistema de enfriamiento del horno. El ~ 70 % de esta pérdida de energía está en el sistema de los gases de extracción apenas siendo dividido aproximadamente 50/50 entre la química en forma de energía no quemada de CO, el H₂ y la energía térmica. Dada la magnitud de la pérdida de energía por los gases de extracción, para mejorar el rendimiento del HAE debe enfocarse en las pérdidas de los gases mejorando la eficiencia de la utilización de la energía dentro del HAE y recuperando la energía térmica.[14]

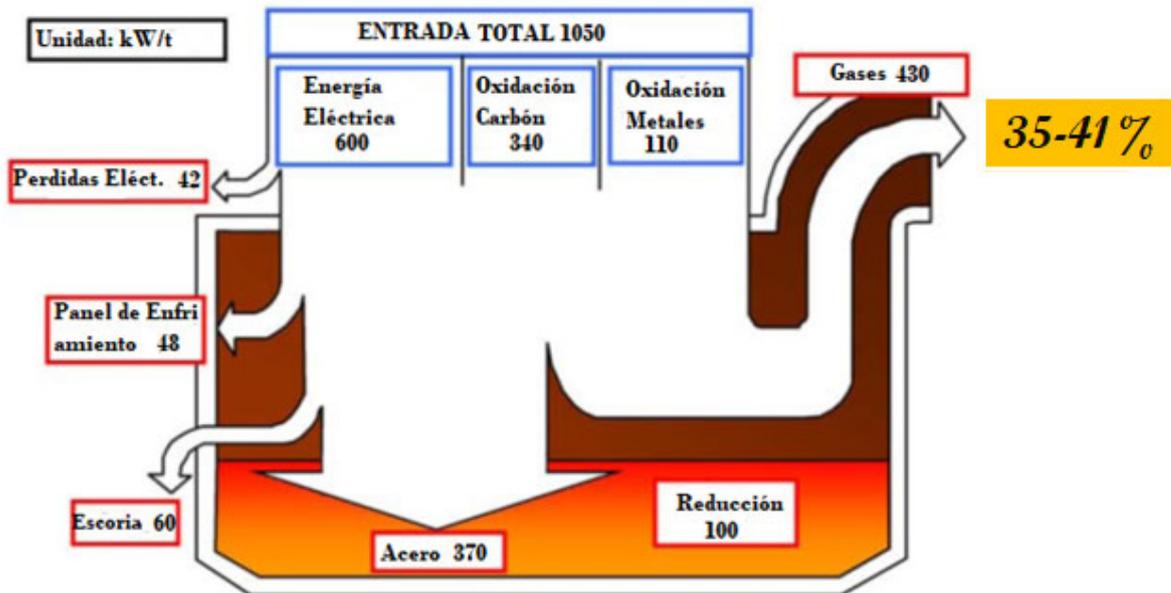


Figura 1.3 Balance de energía para un HAE con prácticas modernas.

Mientras la mayoría de las tecnologías en el área de la industria del acero va dirigida al control de posición de los electrodos, control de impedancia, etc.... Existen tecnologías que se encargan de analizar y controlar en línea todas las variables importantes relacionadas con los gases de extracción, EFSOP o Lindarc™.

Las técnicas modernas están basadas en análisis estadísticos y económicos y controlan el flujo de gases dado que, figura 1.4.

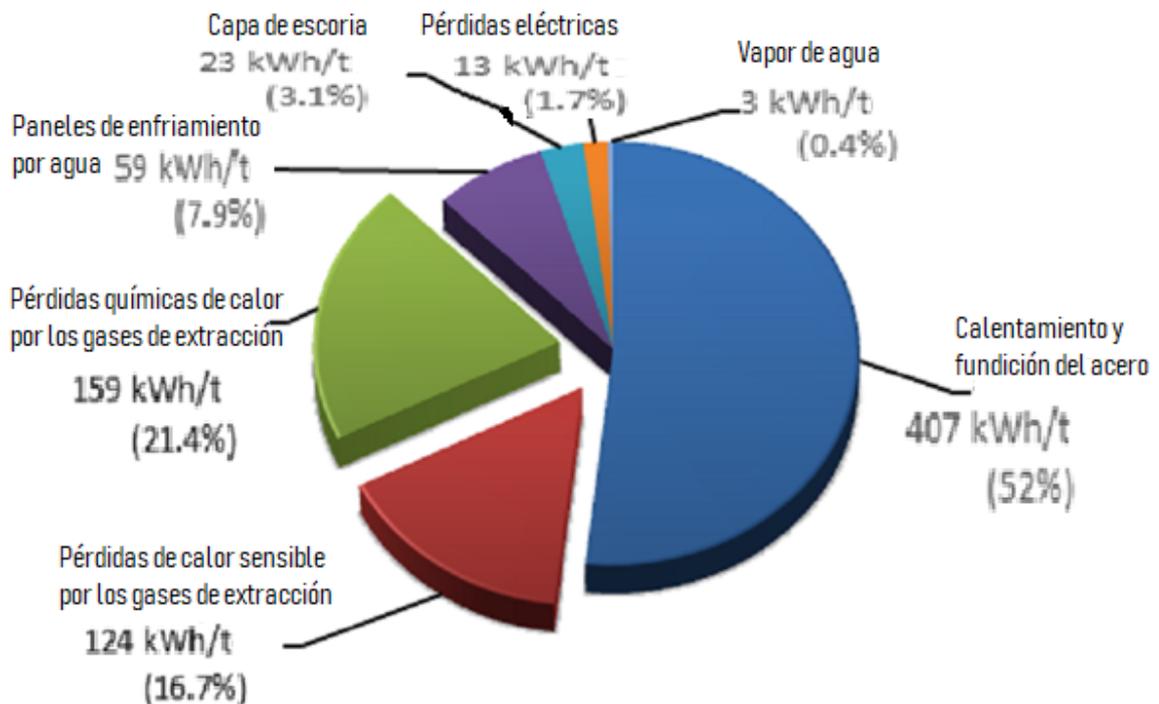


Figura 1.4 Aproximadamente el 35% de la energía que entra en el horno se pierde en forma de calor sensible y química.

En 1998 fue comercializado el primer sistema de extracción con tecnología EFSOP, usa tecnología láser para de forma continua mostrar el espectro completo de los gases de escape.[14] A inicio del 2000, es comercializado Insitu Laser System, este sistema está basado en 3 láseres separados que evalúan el comportamiento del CO₂ y el H₂O, otro para CO y otro para O₂. [22]

El Control dinámico del sistema de extracción de los gases (gas clave N₂) que utilizan todas las tecnologías mencionadas ha demostrado mediante análisis que también puede determinar por qué un horno se oxida demasiado. Dado que la única fuente de N₂ es el aire que ingresa, un horno de oxidación con niveles elevados de O₂ y N₂ al mismo tiempo indica que el HAE está sobregirado. En la Figura 1.5, el pico de reducción corresponde a ~ 33 % de N₂, mientras que el período de oxidación tiene ~ 80 % de N₂, lo que es sintomático de una gran cantidad de aire que ingresa. Alternativamente, un horno eléctrico de arco oxidante con alto contenido de O₂ y N₂ normal tiene un problema de práctica con lanzas o quemadores.[14]

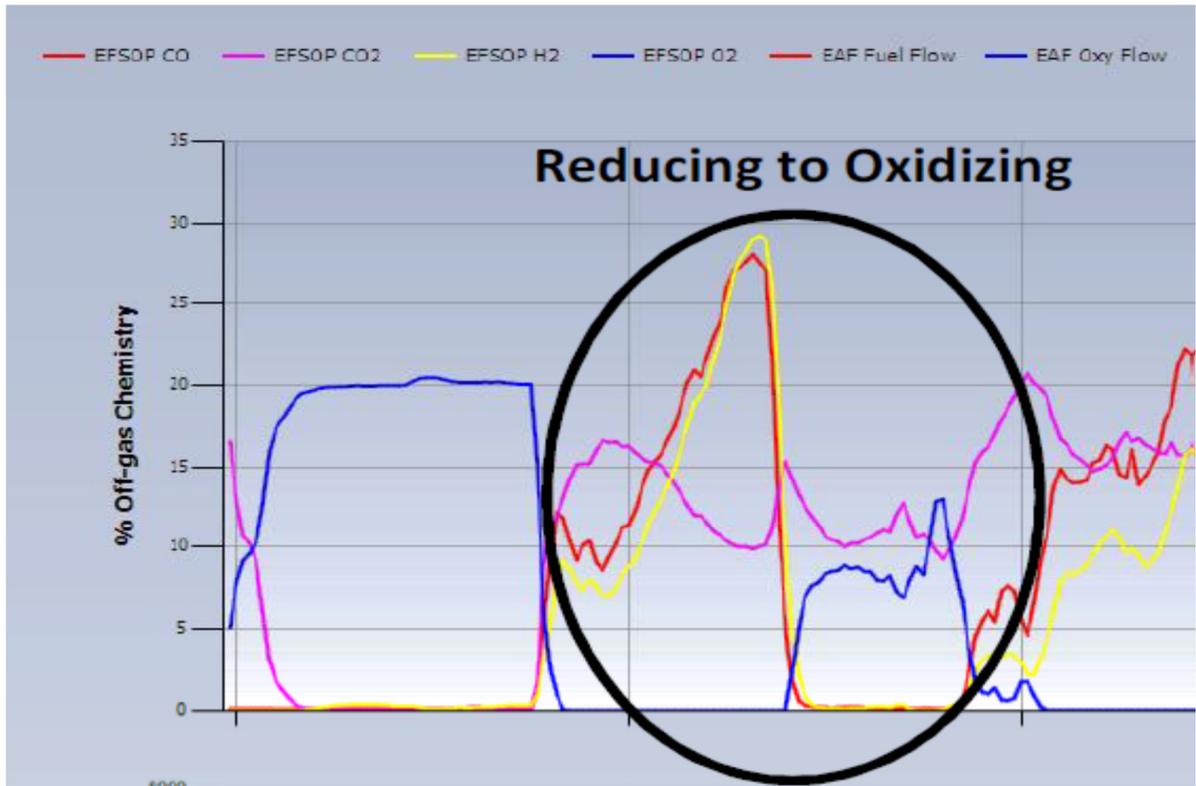


Figura 1.5 H_2 & O_2 son los mejores indicadores del HAE reductor y oxidante respectivamente.

Tenova Goodfellow Inc. la compañía dueña de EFSOP ha establecido algoritmos de control que usan análisis de N_2 para controlar dinámicamente la extracción del sistema para minimizar las condiciones de oxidación debido a la extracción excesiva. Como tal, el análisis de gases de escape de "espectro completo" es importante; las tecnologías que no pueden determinar el N_2 no son efectivas para el control dinámico de la extracción de gases porque no tienen información suficiente para determinar el alcance del sobregiro.

No obstante, en [21] utilizan el CO debido a que en el conducto de salida de los gases del HAE se mezcla el aire que entra por la abertura deslizante con los gases que salen del HAE. El CO combustiona con el O_2 que entra con el aire. La fracción de CO que combustiona es determinada por la temperatura, presión y concentración del oxígeno y el CO en el conducto enfriado. El CO debe ser medido para limitar su fracción de masa en la salida del conducto enfriado con el objetivo de prevenir ignición y explosión en el sistema de filtros. El HAE no puede sellarse

completamente, de modo que siempre hay riesgo de contaminación del medio ambiente en el área de trabajo. Los gases del HAE están mezclados con polvo y estos pueden salir si existen aperturas y la presión relativa interna del HAE no es suficientemente negativa. Los gases contienen alto nivel de CO a altas temperaturas y esto puede causar riesgos severos de seguridad en el área de trabajo.

En la figura 1.6 que muestra 3 componentes del gas en una colada de más de 60 minutos se puede apreciar que existe una relación de proporcionalidad entre el CO₂ y el N₂, que soporta la decisión de los autores de tomar el CO como variable a tener en cuenta en el control dinámico de los gases, teniendo en cuenta que el HAE no puede sellarse completamente, de modo que siempre hay riesgo de contaminación del medio ambiente en el área de trabajo. Los gases del HAE están mezclados con polvo y estos pueden salir si existen aperturas y la presión relativa interna del HAE no es suficientemente negativa. Los gases contienen alto nivel de CO a altas temperaturas y esto puede causar riesgos severos de seguridad en el área de trabajo.

Además, los filtros pueden encenderse y explotar si el contenido de CO del gas residual que ingresa es demasiado alto. Es necesario que el nivel de CO en los gases de salida y la temperatura de estos gases deban ser limitados a niveles seguros.

En referencia al modelo del proceso como abstracción matemática del proceso, en [6, 21, 23] utilizaron los principios de la química, la termodinámica y relaciones empíricas aportadas por los expertos para aproximar las 17 ecuaciones diferenciales que describen el rango de cambio con el respecto al tiempo de cada variable; las mismas se describen en la figura 1.7 como un sistema MIMO, siendo lo más importante para nuestra investigación la selección de las variables manipuladas.

En [23], utilizan restricciones en caso de las variables manipuladas como se muestra en la tabla 1.1 el rendimiento de dicho sistema de control debe evaluarse mediante simulación temporal y en la solución del problema hubo importantes limitaciones físicas.

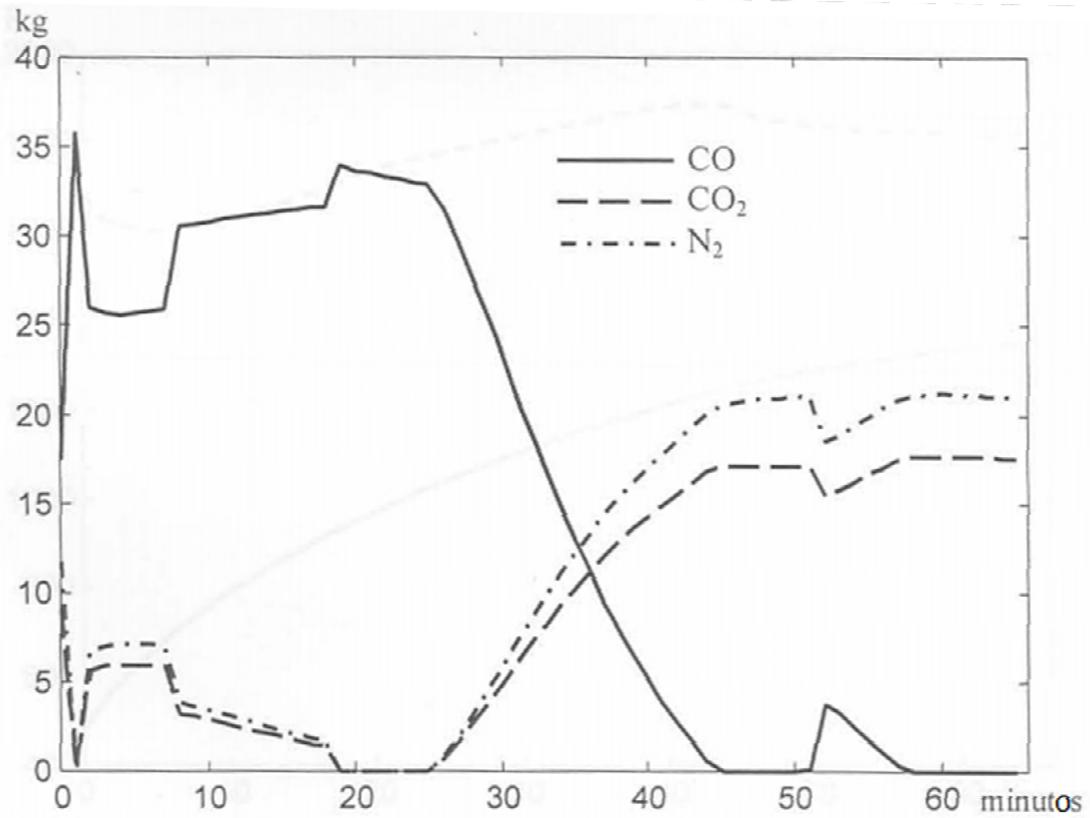


Figura 1.6 CO, CO₂ y N₂ en la fase gaseosa.[23]

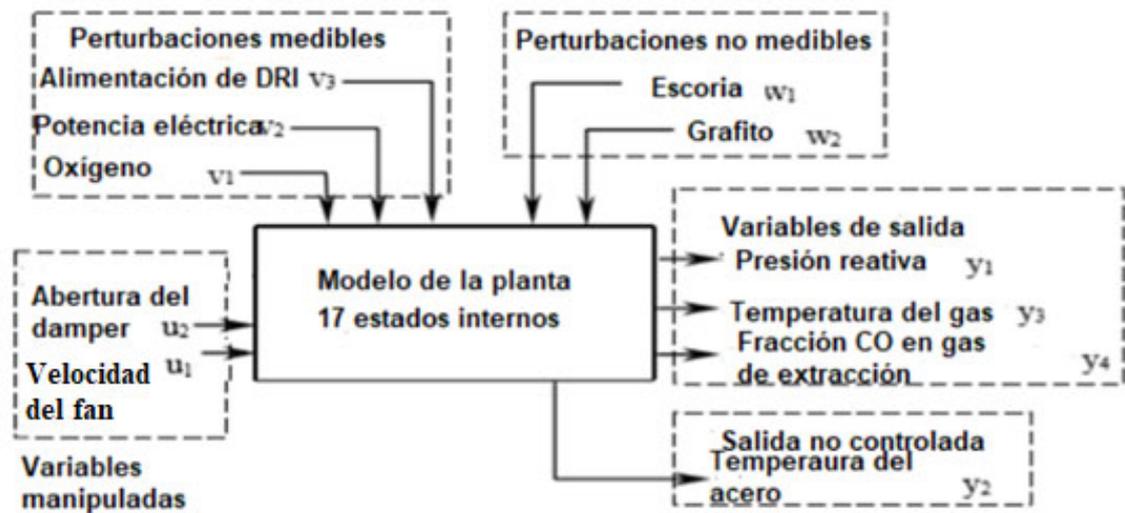


Figura 1.7 Descripción del modelo basado en estudios .[23]

Tabla 1.1 Restricciones de las variables manipuladas

Potencia del fan:u1			Ancho de apertura de dámper:u2		
Mínimo	Velocidad de cambio	Máximo	Mínimo	Velocidad de cambio	Máximo
0 MW	1%/s	1 MW	0.1 m	1%/s	0.5 m

En 2008 tenemos la primera y única referencia del uso de técnicas borrosas en el control de presión de HAE y el análisis de gases. En [2] se dise n  un controlador borroso TSK que permitió comprobar las garantías de estas técnicas y mayor capacidad de control que con un control MPC, figura 1.8. En la figura se puede apreciar un menor tiempo de respuesta y no existen oscilaciones.

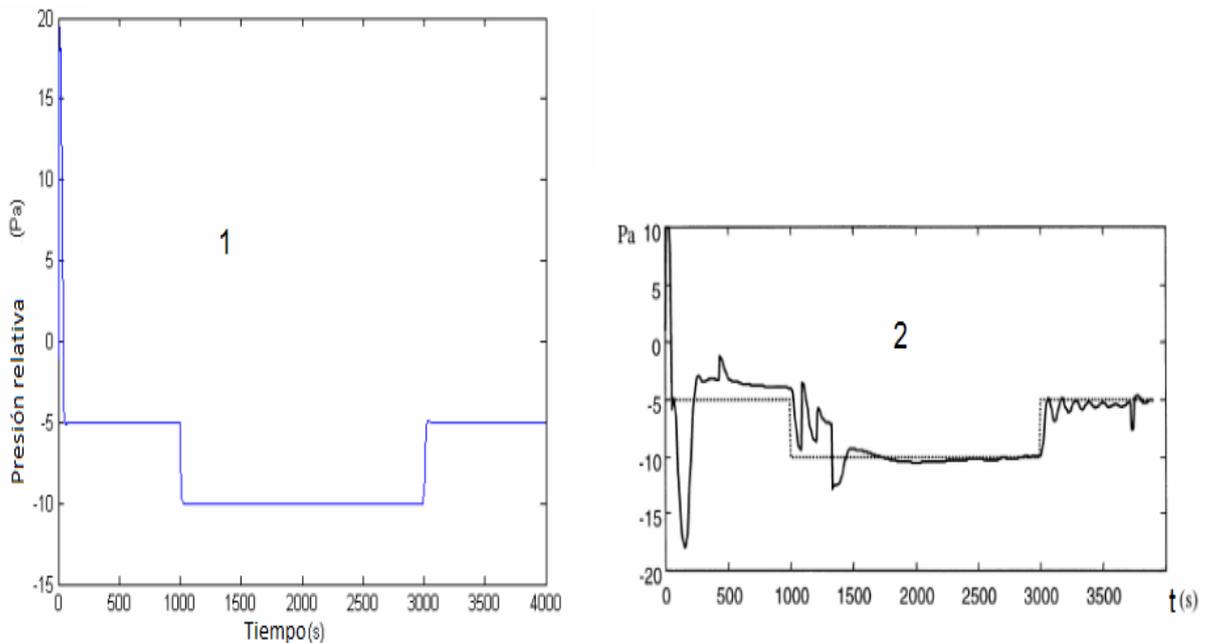


Figura 1.8 Control de presión relativa utilizando técnicas borrosas (1) y MPC (2).[2]

En 2015, bajo el nombre de NextGen@[14], sistema es dise nado para combinar la fiabilidad de la tecnología extractiva tradicional como EFSOP con menor tiempo de respuesta, hardware y láseres menos costoso. Todos estos sistemas de control están dise nados para manipular la velocidad del ventilador de extracción, el dámper y los consumos de oxígenos, carbón y demás sustancias usadas en la fusión.

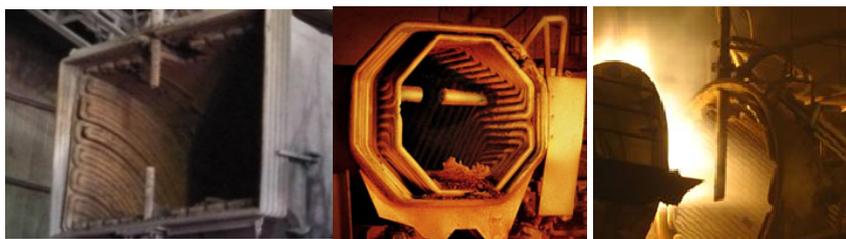


Figura 1.9 Tecnología láser de análisis de gases (EFSOP)

Tabla 1.2 Análisis del espectro de los gases por tecnologías actuales.

Factor de Control de HAE	Análisis de los gases de escape					
Capacidades de análisis	CO	CO ₂	H ₂ O	O ₂	H ₂	N ₂
EFSOP	x	x	x	x	x	x
NextGen	x	x	x	x	x	x
INSITU Laser System 1 láser	x					
2 láseres	x	x	x			
3 láseres	x	x	x	x		
Gas requerido para el control de los gases de extracción						x

Los aspectos de la Tabla 1.2 permiten que el sistema de control actúe sobre el espectro completo de los gases. Es de vital importancia concluir que el contenido de N₂ es necesario para un control dinámico de los gases y relaciona el funcionamiento de HAE en sus etapas de fusión.

El mantener una planta con una operación eficiente permite reducir las pérdidas energéticas en función de los siguientes criterios.

- Al no existir una coordinación entre la extracción de los gases calientes y el proceso se produce una succión en exceso de los gases, lo que afecta la eficiencia del horno, considerando que el calor de los gases cumple la función de aumentar la temperatura de la carga metálica o chatarra para disminuir el tiempo de fusión y que la colada pueda ser preparada en menos tiempo.

- Al no tener una regulación eficiente en las velocidades de los motores que controlan los ventiladores, ya que trabajan a toda su capacidad, esto genera un

consumo excesivo de energía eléctrica en los ventiladores, por lo tanto, se mejoró el sistema de control mediante una modificación del programa de extracción de gases en el PLC.

Lograr un sistema de control dinámico de los gases permite ajustes en proceso que serían capaces no solo de disminuir la extracción energía innecesaria, sino también de mantener en buen estado los filtros de mangas.

La automatización y el control del HAE están limitados por los muchos retos asociados con implementar sensores confiables y de bajo proceso de mantenimiento en el medio ambiente rudo. Según [24], podemos ubicar las sondas y cumplimentar la parte baja de la pirámide de optimización, ver figura 1.6.

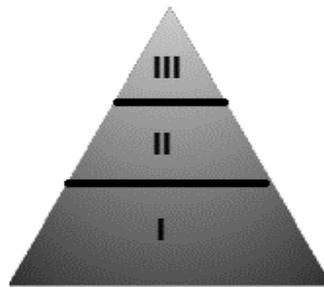


Figura 1.10 Pirámide conceptual de iHAE, I sensores e instrumentación; II Modelos de la dinámica del proceso; III Módulos de Optimización y Control

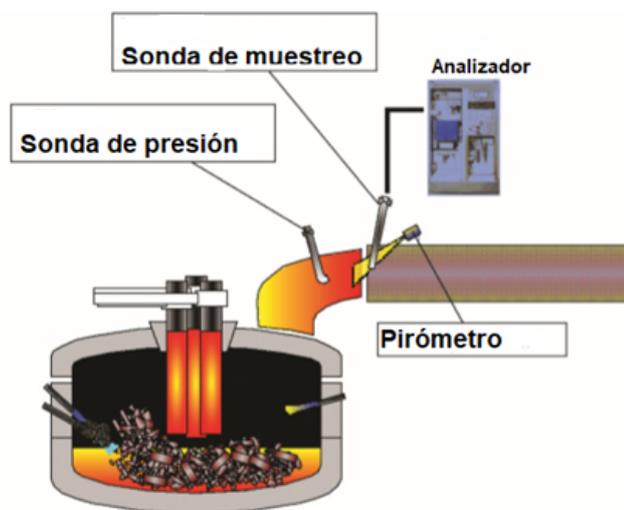


Figura 1.11. Colocación del sistema iHAE

La optimización del proceso del HAE mediante el control dinámico es la opción más confiable en tiempo real y cuenta con las siguientes ventajas (promedio de todas las tecnologías):

1. El costo del sistema es retribuido en un año.
2. Reducción del consumo de energía eléctrica de 20-25 kW/t de acero.
3. De un 4-5% de reducción del funcionamiento del horno.
4. Mantenimiento de 1 hora semanal sin necesidad de personal especializado.
5. Reducción de la emisión de gases en un 18%.

1.4 DISEÑO Y ESTRATEGIA DEL SISTEMA DE CONTROL DINÁMICO DE LOS GASES DE EXTRACCIÓN DEL HAE

En la figura 1.12 se muestra el HMI que sirve al operador para manejar manualmente las distintas variables que participan en el control de la succión de los gases, tanto, del secundario como del primario. El sistema manual actual carece de recursos para brindar un resultado en correspondencia con los niveles de contaminación y de eficiencia que se están necesitando en la fábrica, sino que también sería de viabilidad para nuestro país.

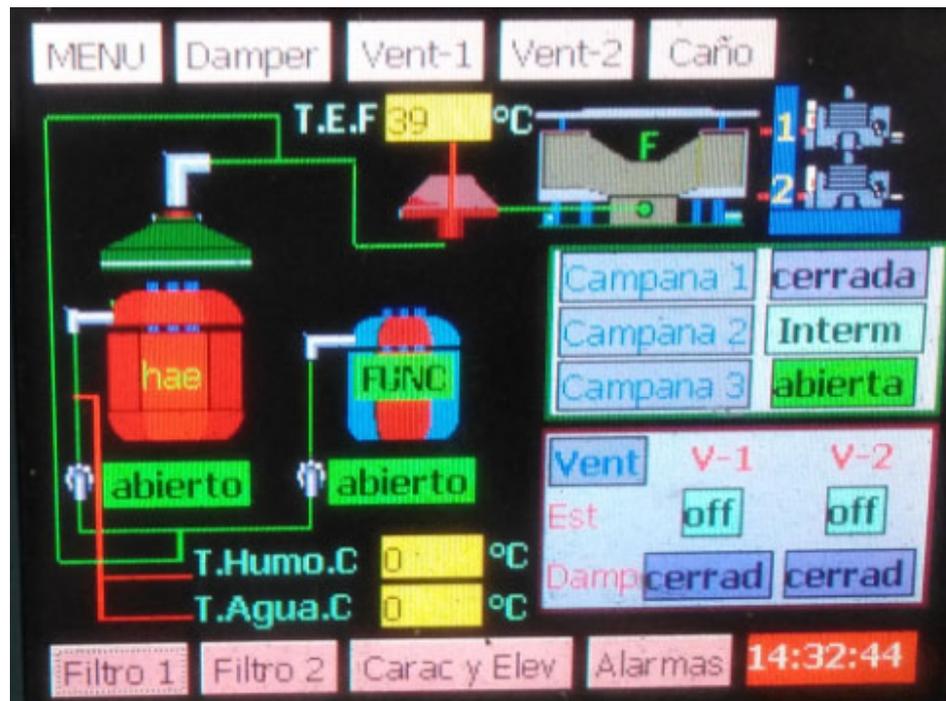


Figura 1.12 HMI control de sistema de extracción HAE Acinox Las Tunas.

Con el objetivo de optimizar el sistema de control y llevarlo a niveles eficaces, se midieron diferentes variables, y en conjunto con los expertos y la bibliografía estudiada decidir cuáles aportan los mejores dividendos.

Un recurso muy importante y que a nivel mundial resultó más efectivo es el control inteligente, 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, se inspira en cómo los sistemas biológicos resuelven problemas y los aplica 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 o los modelos conllevan a la necesidad de equipos con hardware potente que resuelva grandes ecuaciones matemáticas y la información apriorística acerca de éste es de carácter esencialmente cualitativo.

El problema de control constituye una típica de toma de decisiones y para este tipo de problemas la creación de la lógica borrosa (fuzzy) por Lofti Zadeh a inicios de los 60 significó la aparición de una nueva y poderosa herramienta para enfrentarlo en situaciones de imprecisión esencial en modelos, información, objetivos, restricciones y acciones de control.[25, 26]

La denominada lógica borrosa (fuzzylogic) permite tratar información imprecisa, como estatura media, temperatura baja o mucha fuerza, en términos de conjuntos borrosos. 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.[27, 28]

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[26]:

La lógica borrosa 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, por lo que obligan a la búsqueda de modelos alternativos que permitan obtener valores numéricos a partir de variables lingüísticas.[28]

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.[28]

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 $\mu(x)$ de ellas existen diferentes tipos: Singleton, Conjunto cortado, triangular, trapezoidal, gaussiana, campana generalizada, sigmoidal.[29]

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, el controlador borroso, Figura 1.13.

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.

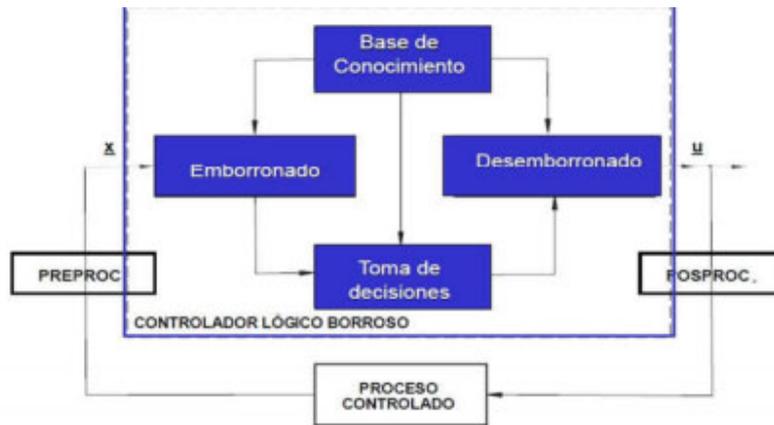


Figura 1.9 Estructura de un controlador borroso.

La mayor ventaja del esquema borroso es la capacidad de detectar situaciones incipientes, en comparación con la lógica binaria basada en umbrales. Como dentro de la denominación de sistemas de control se incluyen sistemas muy diversos, con objetivos distintos, utilizando información muy diferenciada y específica para cada caso y con un tratamiento de la información que depende no solo de los objetivos sino también de la metodología empleada en el diseño del sistema de control. Lo que siempre aparece es una estructura básica en la que se distinguen dos subprocesos que interactúan: la planta a controlar y el controlador que genera las señales de control. Y, a otro nivel, el operador humano que puede desempeñar un papel más o menos activo según el grado de automatización del sistema.

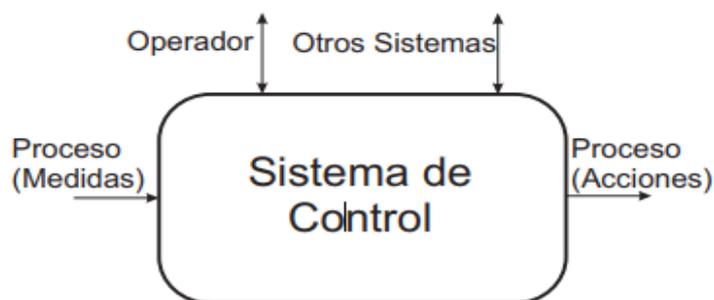


Figura 1.10 Subsistema de control

Este conjunto puede tener múltiples estructuras (de forma general se puede representar como la figura 1.10): 1) Conexión únicamente desde el controlador al proceso, *control a lazo abierto*. Basado en el conocimiento del modelo del proceso y los objetivos de control, el controlador genera las señales que actúan sobre el proceso. 2) Conexión únicamente del proceso al controlador, *sistema de seguimiento*. En este caso, el sistema de control que más bien hace de sistema de adquisición de datos, toma información del proceso, la elabora y la presenta en formato adecuado al operador, que es quien toma las decisiones y manipula las entradas al proceso. 3) Cabe una combinación de ambas, en la que es el operador el que cierra el bucle entre el sistema de adquisición de datos y el controlador, dando lugar a un *lazo de control manual*. 4) Finalmente, la actividad del operador puede quedar limitada a tareas de vigilancia y el *control automático a lazo cerrado* lo realiza el sistema de control.[30]

En correspondencia con el marco teórico presentado se propone un esquema basado en (4), el mismo funcionará con un controlador borroso y de esta forma cumplir con la hipótesis científica que se ha planteado. Obsérvese en la Figura 1.10.

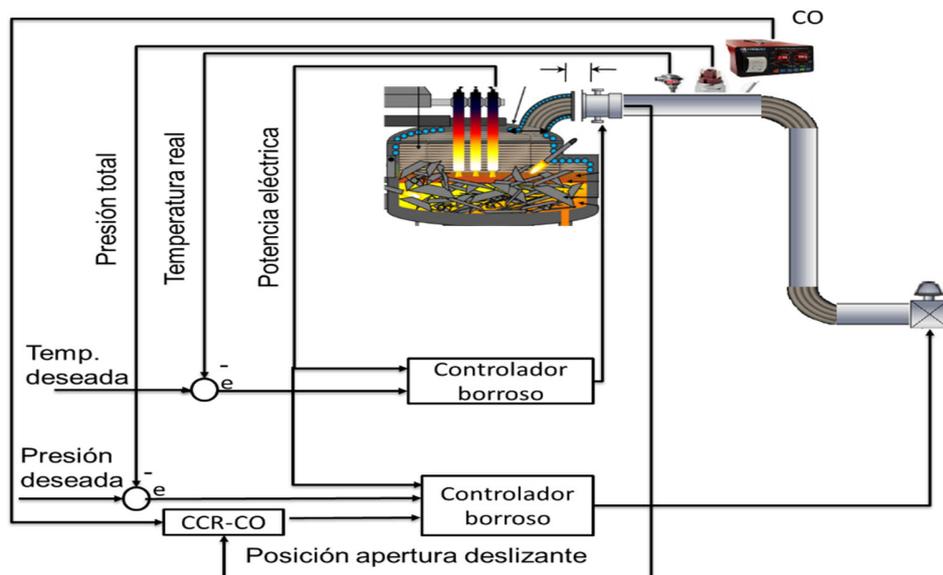


Figura 1.10 Sistema propuesto.

CONCLUSIONES

A lo largo de esta contribución se han presentado las bases de la importancia del control de los gases de extracción y diseño de sistemas de control con lógica borrosa como una opción integradora, permitiendo una más fácil interacción con los diversos problemas de control. Del mismo modo, también debe tomarse esta perspectiva integradora al evaluar las posibilidades de diseño de sistemas de control que nos proveerá información necesaria para próximas investigaciones y prácticas.

La lógica borrosa no es ni pretende ser una solución universal (“panacea”) a los problemas de control, pero si es una interesante alternativa y/o complemento al desarrollo de sistemas de control complejos atendidos por todo tipo de usuarios, no solamente los expertos en control.

2 DISEÑO DE UN CONTROLADOR BORROSO PARA CONTROL DINÁMICO DE LOS GASES DE EXTRACCIÓN EN EL INTERIOR DEL HAE

INTRODUCCIÓN

Una vía muy importante para la mejora del rendimiento energético de un HAE es la optimización del control 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, etc.) 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 un controlador borroso que controla la presión total en el conducto, la temperatura de los gases y el contenido de C de los gases. 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 y las cuales representan el comportamiento dinámico de este proceso.

2.1 FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE LA PROPUESTA

Basado en los artículos estudiados necesitamos de un equipamiento que pueda medir y registrar en el ambiente hostil que es el conducto de salida de los gases, temperatura, presión total y concentración de CO, además registrar la energía total que se consume en el HAE. 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 analizar el sistema de los gases de extracción

Capítulo 2. Diseño de un controlador borroso para control dinámico de los gases de extracción en el interior del HAE

<i>Criterio</i>	<i>Analizador de gases y sensores</i>	<i>Comportamiento del proceso</i>
Confiabilidad	Protección para ambiente agresivos	Depende de la calidad de la medición de las variables
Procesamiento de señales	Programa interno	Procesamiento a través de programas computacionales
Montaje e instalación	Se instala en la parte externa del conducto	Valoración con expertos y análisis situacional
Costos	Relativamente costo medio	Relativamente costo medio
Mantenimiento	Poco frecuente	Según programación

Luego de realizar estudios comparativos sobre las posibles mediciones de variables que reflejen de manera directa las perturbaciones en el proceso de extracción de gases y con el análisis de la Tabla 2.1, se arriba a la conclusión que para el caso objeto de estudio, el sistema a utilizar con Controlador Borroso tiene que ser capaz de controlar mediante el dámper y la abertura deslizante la presión total en el interior del HAE.

En nuestro caso, dada la imposibilidad actual de manejar la potencia de los ventiladores de extracción, escogeremos el desplazamiento de la abertura deslizante. La apertura de la misma suministrará aire exterior al ducto y eso tiene consecuencias sobre la composición del mismo, sobre la temperatura y sobre el ambiente de trabajo.

En la bibliografía estudiada más actual se hace referencia a la medición de N₂ como el gas más completo para el control dinámico de los gases[14], dado que el

Capítulo 2. Diseño de un controlador borroso para control dinámico de los gases de extracción en el interior del HAE

equipamiento a utilizar no cuenta con esta posibilidad nos auxiliaremos de las bibliografías pioneras en el tema [2, 6].

2.2 DISEÑO DE EXPERIMENTOS.

2.2.1. DETERMINACIÓN DE LAS VARIABLES Y MANGITUDES PARA CONTROL DINÁMICO DE LOS GASES EN EL HAE

Luego de un profundo estudio bibliográfico arribamos a la necesidad de realizar experimentos para conocer el estado y composición de los gases de extracción del HAE y determinar qué efecto provoca la manipulación del dámper y la válvula deslizante sobre los gases; con el apoyo de los expertos determinar los valores máximos, mínimos y óptimos de cada variable. Los objetivos de control del sistema de extracción de gases están basados en dos importantes propósitos que entran en conflicto, la mejora de la eficiencia del sistema y la protección ambiental.

Los experimentos tienen una fase de medición, registro de datos y manipulación de dámper y abertura deslizante en distintos escenarios; que acciones acomete el operador, que aconsejan los expertos y en comparación con la bibliografía que decisiones hay q tomar.

En este caso, tendremos 2 variables de salida, el desplazamiento de la abertura deslizante y la abertura del dámper.

Identificación de variables:

Primer sistema de inferencia borrosa:

- Variable Dependiente (Salida del modelo): Posición de la abertura deslizante.
- Variables Independientes (Entradas del modelo): Temperatura y potencia media móvil.
- Variables Controladas: Temperatura.

Segundo sistema de inferencia borrosa:

Capítulo 2. Diseño de un controlador borroso para control dinámico de los gases de extracción en el interior del HAE

- Variable Dependiente (Salida del modelo): Abertura del dámper
- Variables Independientes (Entradas del modelo): Concentración de CO, Potencia media móvil y presión total.
- Variables Controladas: Presión total.

Evaluación de riesgos:

- Quemaduras por exposición al Calor, salpicaduras, etc. Golpes mecánicos. Caída de altura.
- Materiales y personal calificado:

Analizador de gases GASBOARD 3000 y accesorios; analizador de Redes; Cinta métrica; Celulares; Cascos Protectores; Traje de protección a altas temperaturas; Guantes para protección mecánicas y altas temperaturas; Operador con experiencia en HAE; Tecnólogo del área, Eléctrico especialista de mantenimiento.

Plan general

- 1- Medir y registrar temperatura de gases;
- 2- Medir y registrar presión total de los gases;
- 4- Medir y registrar energía consumida;
- 5- Conocer el valor del flujo de gas;
- 6- Observar operación de dámper y abertura deslizante;
- 7- Preguntar por calidad del control manual;

Realizar experimentos en tres escenarios:

- a. Abertura y cierre de la abertura deslizante por tiempo mínimo de 1 minuto.
- b. Abertura y cierre del dámper por tiempo mínimo de 1 minuto.

Capítulo 2. Diseño de un controlador borroso para control dinámico de los gases de extracción en el interior del HAE

c. Abertura y cierre del dámper y apertura deslizante al mismo tiempo, mínimo 1 minuto.

Existen importantes variables que ya se miden en el proceso y sus valores son almacenados en el servidor, la energía consumida, tanto, la química como la eléctrica.



Figura 2.2 Analizador de gases GASBOARD 3000 y accesorios.

Los datos necesarios de temperatura, presión, etc.... son almacenados en el analizador para su posterior análisis, la figura 2.3 muestra el lugar del experimento.



Figura 2.3 Analizador de gas colocado después del codo refrigerador del HAE.

En cada colada que se estudi  y se fue tabulando en tiempo real las diferentes variables, y las acciones del operador respecto al sistema primario de extracción.

Capítulo 2. Diseño de un controlador borroso para control dinámico de los gases de extracción en el interior del HAE

También se realizaron pruebas en los 3 escenarios correspondientes, en cuanto, a dámper y abertura deslizante.

A continuación, un resumen de las coladas (de forma consecutiva en 2 días de estudio) que se tuvieron en cuenta para lograr las muestras obtenidas:

Tabla 2.1 Coladas objetos de estudio en el Horno Cuchara ACINOX Las Tunas

14020	23/07/2021	4
14022	24/07/2021	3
14023	24/07/2021	3
14024	24/07/2021	4
14025	24/07/2021	4

En la figura 2.4 se aprecia la energía que se extrae por los conductos sin ningún control, ni se evidencian acciones por parte del operador para contrarrestar la situación.

Capítulo 2. Diseño de un controlador borroso para control dinámico de los gases de extracción en el interior del HAE



Figura 2.4 Experimento medición de variables gases de extracción.

2.2.2. RECOLECCIÓN DE LOS DATOS EXPERIMENTALES

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

Tabla 2.2. Recolección de datos variables independientes.

<i>Fecha</i>	<i>Tiempo</i>	<i>T gas(°C)</i>	<i>Potencia (MW)</i>	<i>Abertura deslizante (%)</i>

Tabla 2.3. Recolección de datos variables independientes 2.

<i>Presión Total (Pa)</i>	<i>CCR-CO (ppm)</i>	<i>Potencia MW</i>	<i>Válvula de extracción (%)</i>

Al analizar las variables que intervienen en el proceso, se creó a partir de ellas el *coeficiente de relación de contenido de CO (CCR-CO)*

Capítulo 2. Diseño de un controlador borroso para control dinámico de los gases de extracción en el interior del HAE

$$CCR_{CO} = \left(1.29 + \frac{POS_{virola}}{100} \right) \quad 2.1$$

La variable es la relación aproximada del aumento del contenido de CO cuando se desplaza la abertura deslizante y el aire se mezcla con los gases aumentando los niveles de CO₂.

Con el objetivo de conocer el comportamiento de las variables y su relación con el cierre y apertura de dámper y abertura deslizante se graficaron distintos escenarios. Figuras 2.4 a la 2.6

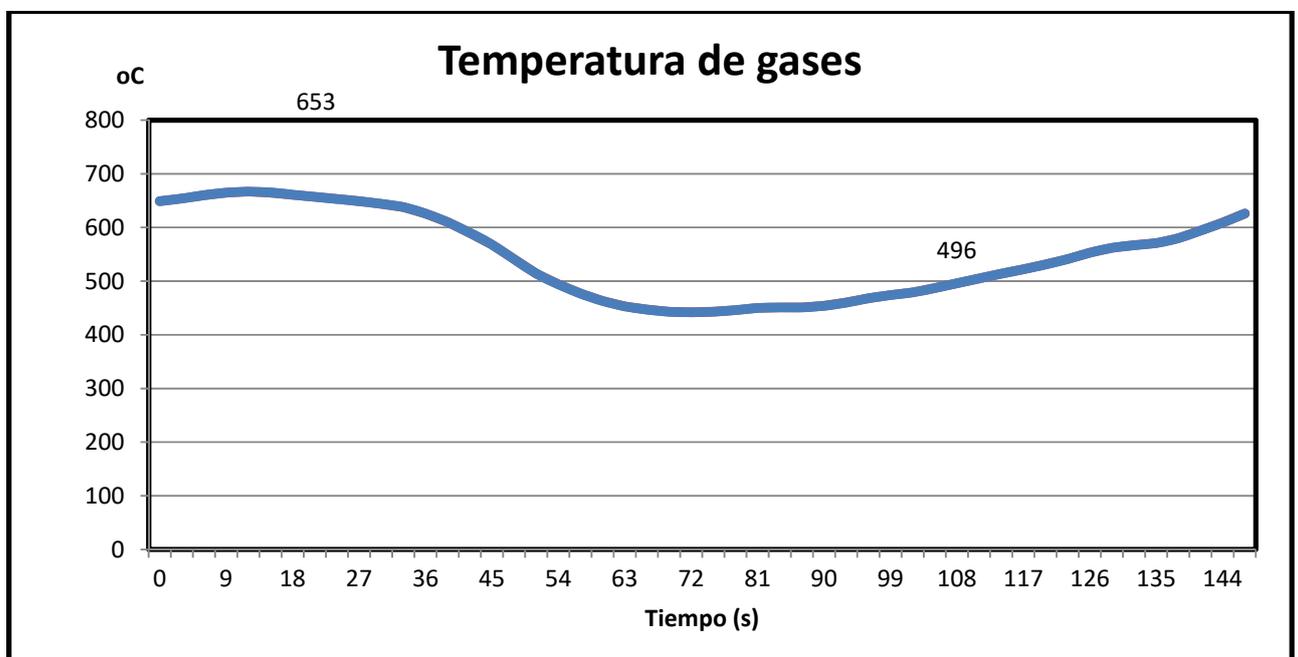


Figura 2.4 Comportamiento de la temperatura en la colada 14025 (147s).

En la figura 2.4 se puede observar una disminución de la temperatura que comienza con la apertura de la abertura deslizante, en el instante 24s con 653 oC hasta el instante 108s con 496 oC y temperatura mínima.

En caso de la figura 2.5 se representa el caso del comportamiento de la concentración del CO, al entrar más aire por la abertura deslizante disminuye la

Capítulo 2. Diseño de un controlador borroso para control dinámico de los gases de extracción en el interior del HAE

concentración evidenciándose desde el instante 42s con 1290ppm hasta que se cierra la abertura y en el instante 165s la concentración es de 351 ppm.

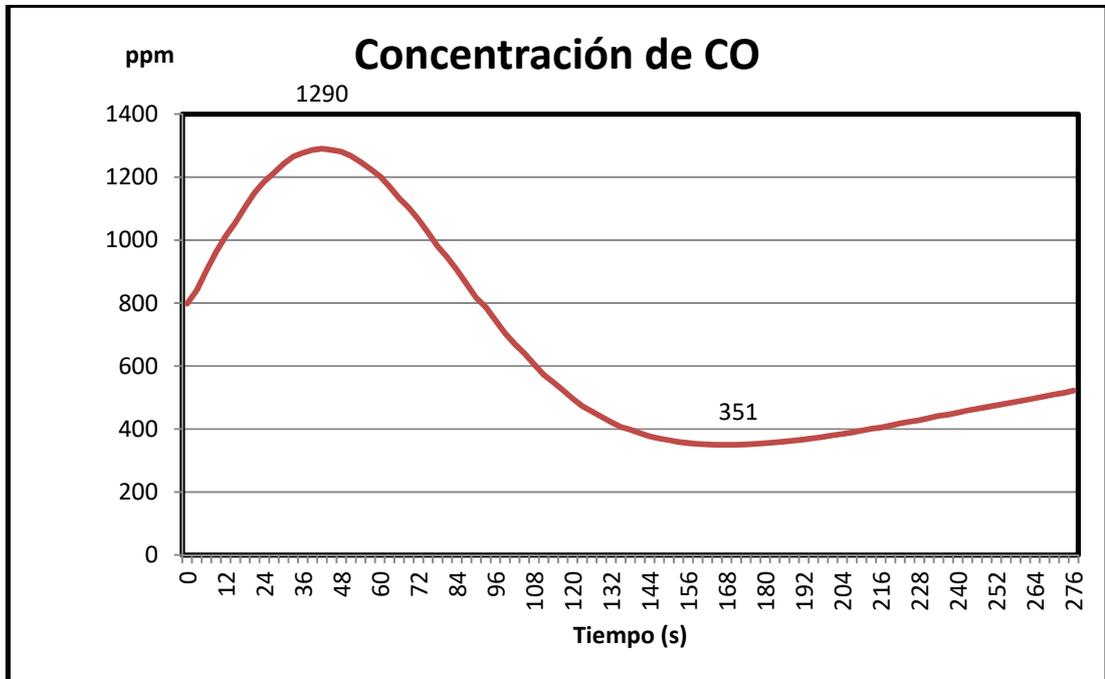


Figura 2.5 Comportamiento de la concentración de CO en la colada 14024 (276s).

En la figura 2.6 se evidencia lo que ocurre con el comportamiento de la presión total en el conducto de los gases cuando se manipula el damper. El equipo se encarga de medir la presi3n dinamica y la presi3n estatica dentro del conducto de extracci3n, la suma de la misma es la que se ve reflejada en nuestra tabla y la que vamos a utilizar, en un periodo de 372s se evidenci3 que ante el cierre del damper la presi3n total aumenta notablemente de 270 Pa hasta 402 Pa.

Capítulo 2. Diseño de un controlador borroso para control dinámico de los gases de extracción en el interior del HAE

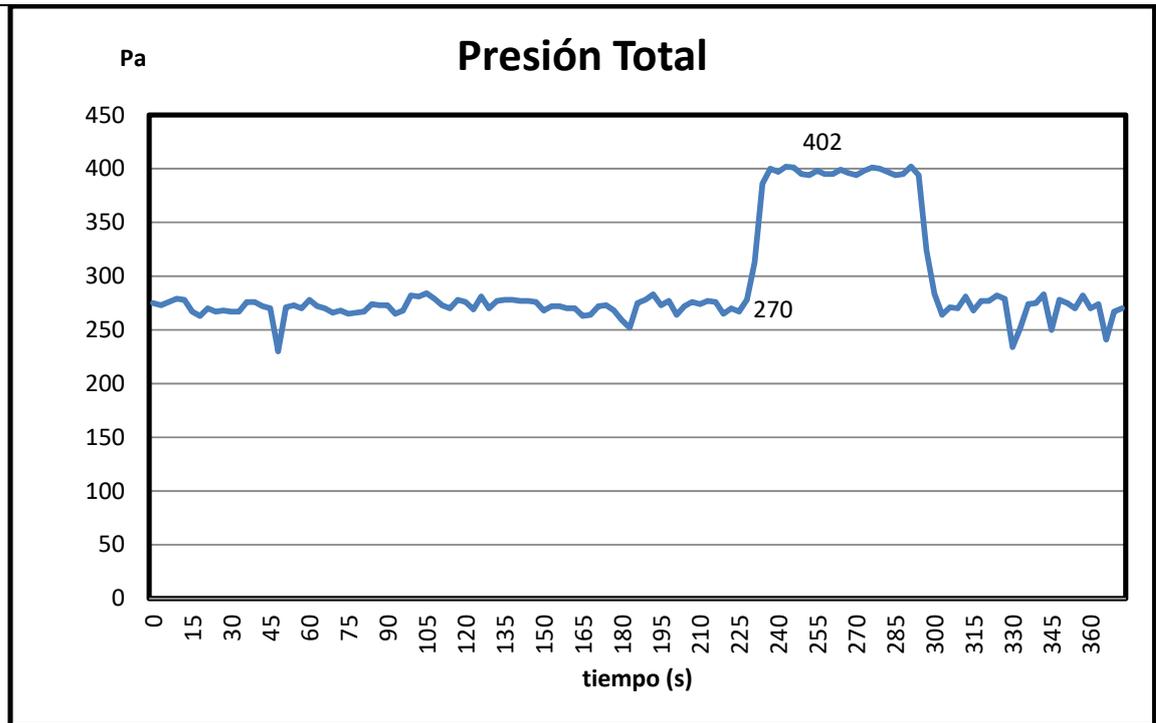


Figura 2.6 Comportamiento de la presión total 14023 (372s).

2.3. ESQUEMA PROPUESTO

Actualmente no existe sistema de control y la abertura deslizante y el dámper se manipulan manualmente. En este trabajo se propone un controlador borroso utilizando el método TSK, el mismo controlará la posición de la abertura deslizante y el dámper. Con ello, se podrá mantener una presión total en el conducto, temperaturas óptimas para el proceso y contenido de CO en gas inferiores al 1%. Ver Anexo 1 para esquema Simulink.

2.3.1 MODELADO DEL SISTEMA DE INFERENCIA BORROSA ABERTURA DESLIZANTE.

Para las entradas se utilizarán las variables temperatura de los gases y potencia media útil. Para el sistema de inferencia borrosa FIS_ Abertura deslizante se utilizó el software Matlab®, figura 2.8.

Capítulo 2. Diseño de un controlador borroso para control dinámico de los gases de extracción en el interior del HAE

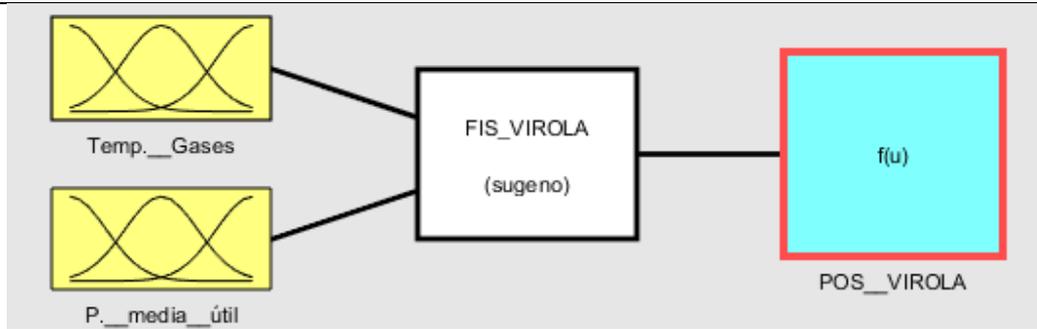


Figura 2.8 Sistema de inferencia borrosa Abertura deslizante.

Los universos discurso y subconjuntos de las variables de entrada partir de los datos recogidos. Tabla 2.3.

Tabla 2.3 Subconjuntos Difusos posición de la abertura deslizante.

Universo Discurso							
Presión Total (Pa)		CCR-CO (ppm)		MM Potencia en 30 s (MW)		Pos. Deseada Dámper	
Menor	Mayor	Menor	Mayor	Menor	Mayor	Menor	Mayor
0	493	0	7999	0	0,13		
0	500	0	10000	0	0,15	0	1
Subconjuntos Difusos							
0 --- 250	Bajo	0 --- 1000	Bajo	0 --- 0.02	Bajo		Oxidante
200 ---350	Medio	800 ---3000	Medio	0.016--0.03	Medio		Equilibrada
300--- 500	Alto	2800--- 10000	Alto	0.026 - 0.15	Alto		Reductora

En las Figura 2.12, 2.13 y 2.14 Anexo 2, se muestran los Subconjuntos Borrosos y su función de pertinencia de las variables de entrada.

En la Figura 2.15 Anexo 2, se muestran la variable de salida: Pos_Apertura deslizante.

Luego de definir los universos de discursos y subconjuntos borrosos se desarrolló la base de conocimientos mediante la utilización de reglas. En el Anexo 2, se muestra

Capítulo 2. Diseño de un controlador borroso para control dinámico de los gases de extracción en el interior del HAE

el conjunto de reglas teniendo en cuenta todas las posibles variantes para una salida constante de 0 a 1.

2.3.1 MODELADO DEL SISTEMA DÁMPER.

Para las entradas se utilizarán las variables potencia media útil, presión total y CCR-CO.

Para el sistema de inferencia borrosa FIS_ Abertura deslizante se utilizó el software Matlab®, con el siguiente sistema de inferencia borrosa, figura 2.9.

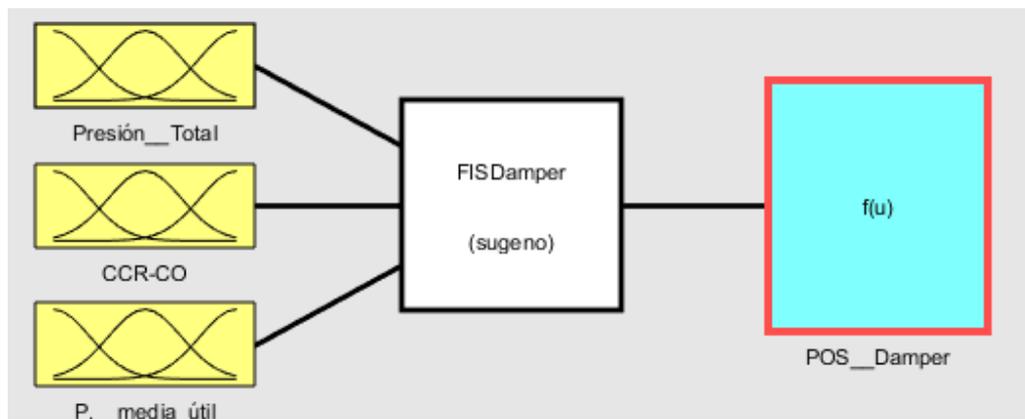


Figura 2.9 Sistema de inferencia borrosa dámper.

Luego se selecciona los universos discurso y subconjuntos de las variables de entrada a partir de los datos tomados de las 2 variables de entrada. Tabla 2.4

Tabla 2.4 Subconjuntos difusos dámper.

Universo Discurso							
Presión Total (Pa)		CCR-CO (ppm)		MM Potencia en 30 s (MW)		Pos.Deseada Dámper	
Menor	Mayor	Menor	Mayor	Menor	Mayor	Menor	Mayor
0	493	0	7999	0	0,13		
0	500	0	10000	0	0,15	0	1
Subconjuntos Difusos							
0 --- 250	Bajo	0 --- 1000	Bajo	0 --- 0.02	Bajo		Oxidante
200 ---- 350	Medio	800 ---3000	Medio	0.016--0.03	Medio		Equilibrada

Capítulo 2. Diseño de un controlador borroso para control dinámico de los gases de extracción en el interior del HAE

300---		2800---					
500	Alto	10000	Alto	0.026 - 0.15	Alto		Reductora

En las Figura 2.12, 2.13 y 2.14 Anexo 2, se muestran los Subconjuntos Borrosos y su funciones de pertinencia de las variables de entrada.

En la Figura 2.15 Anexo 2, se muestran la variable de salida: Pos_Dámper

Luego de definir los universos de discursos y subconjuntos borrosos se desarrolló la base de conocimientos mediante la utilización de reglas. En el Anexo 2, se muestra el conjunto de reglas teniendo en cuenta todas las posibles variantes para una salida constante de 0 a 100.

2.4. RESULTADOS A ESCALA DE SIMULACIÓN DEL SISTEMA PROPUESTO.

El objetivo de esta sección es evaluar el sistema propuesto en la Figura1.10 observando cómo responde ante cambios en las variables de entrada, se definen como objetivos de control:

Tabla 2.5 Objetivos de control

Objetivos de Control		
Temperatura (°C)	Presión Total (Pa)	Concentración de CO
400 < T < 600	180 < Pt < 250	CO < 1% (10000 ppm)

Atendiendo a la prioridad de demostrar la capacidad del esquema propuesto para compensar las variaciones de las magnitudes en los gases, y llevar a una medida acertada el valor deseado del control de presión se diseñaron 3 experimentos para representar todas las variantes de la población estudiada: colada normal y coladas con los casos de manipulación de abertura deslizante y/o dámper.

Pudiendo observar aumento de la presión y disminuciones de temperatura y concentración de CO cuando se abre la abertura deslizante. Todos los experimentos se realizaron con la ayuda de la herramienta Simulink en Matlab. Figura 2.10.

Capítulo 2. Diseño de un controlador borroso para control dinámico de los gases de extracción en el interior del HAE

Figura 2.10 Diseño del experimento den Simulink

Descripción del experimento 1

Se realiza experimento con datos de la colada 14023 de fecha 24 de julio de 2021 hora de comienzo 10:06 am y hora de finalización 11:46 am. Particularmente, se seleccionó un intervalo de 447 s, desde 11:32.23 am hasta 11:39:50 am, con un período de muestreo de 3s, utilizando valores de las variables temperatura y media móvil de la potencia para valorar el desempeño de la técnica de control escogida ante un aumento excesivo de la temperatura sin intervención correctora del operador.

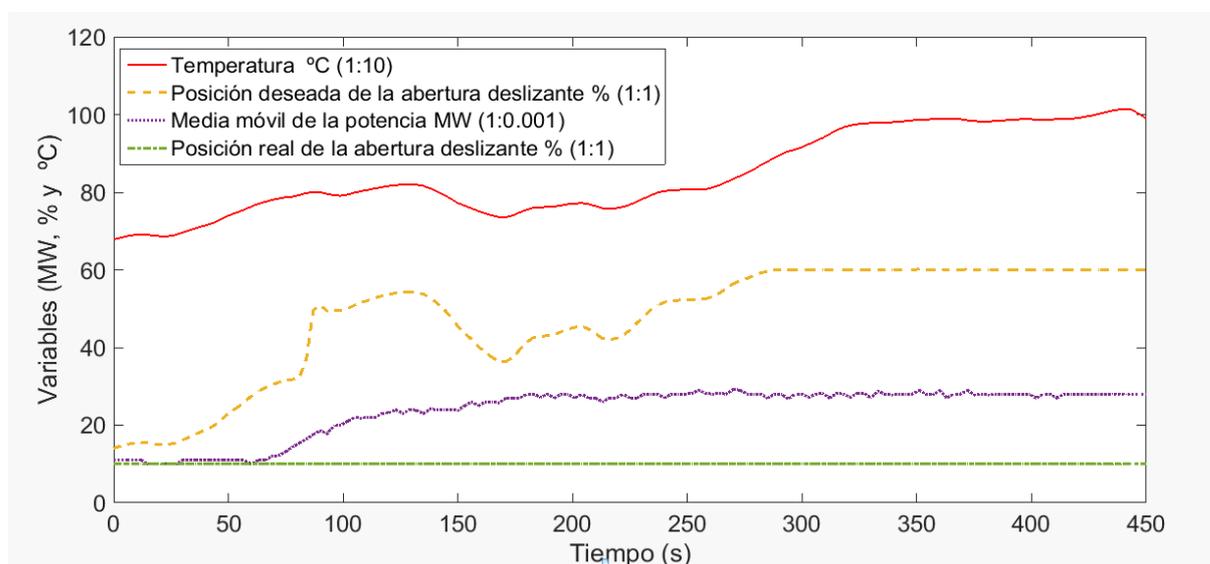


Figura 2.10 Simulación del experimento 1

Como se puede apreciar en la figura 2.10 el sistema de control actúa con diferencia respecto a la situación actual, abertura deslizante cerrada, el operador no actúa ante una temperatura crítica que alcanza los 1000 °C y es perjudicial para el proceso.

Descripción del experimento 2

Se realiza experimento con datos de la colada 14023 de fecha 24 de julio de 2021 hora de comienzo 10:06:01 am y hora de finalización 11:46:50 am. Se analiza con extracto de datos desde 10:54:40 am hasta 10:56:34 am. Se establece un período de

Capítulo 2. Diseño de un controlador borroso para control dinámico de los gases de extracción en el interior del HAE

muestreo de 3 s, permitiendo utilizar valores de las variables temperatura y potencia media móvil. Se valora el desempeño de la técnica de control escogida ante una disminución de la temperatura por apertura manual de la abertura deslizante sin acción correctora del operador.

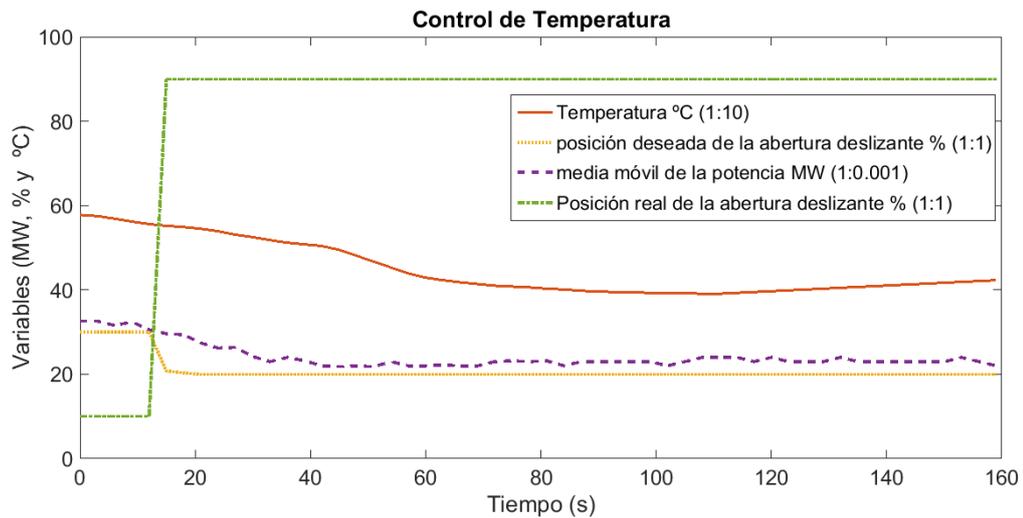


Figura 2.11 Simulación experimento 2

Como se puede apreciar en la figura 2.11 el sistema reacciona ante una disminución de temperatura sin acción correctora del operador, en este instante de tiempo no es necesaria ni conveniente para el proceso la apertura de la abertura deslizante.

Descripción del experimento 3

Se realiza experimento con datos de la colada 14023 de fecha 24 de julio de 2021 hora de comienzo 10:06.01am y hora de finalización 11:46.50am. Se analiza con extracto de datos desde 10:43.10am hasta 10:45.46am. Se establece un período de muestreo de 3s, permitiendo utilizar valores de las variables potencia media móvil, CCR-CO y presión total. Se valora el desempeño de la técnica de control escogida ante un aumento de la presión total provocado por el cierre total del dâmpner sin acción correctora del operador.

Capítulo 2. Diseño de un controlador borroso para control dinámico de los gases de extracción en el interior del HAE

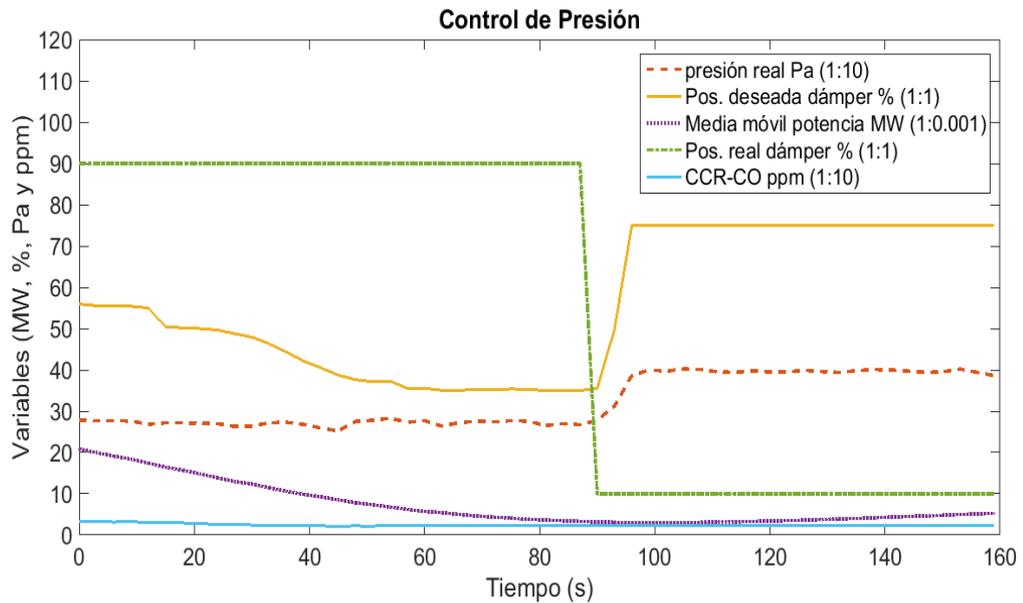


Figura 2.12 Simulación experimento 3

Como se puede observar en la figura 2.12 la posición deseada del dámper para contrarrestar el aumento de la presión dista mucho de la posición real del mismo, el operador no realiza ninguna acción correctora.

Descripción del experimento 4

Se realiza experimento con datos de la colada 14025 de fecha 24 de julio de 2021 hora de comienzo 2:43.47pm y hora de finalización 4:18.21pm. Se analiza con extracto de datos desde 3:25:02 pm hasta 3:30:02 pm. Se establece un período de muestreo de 3s, permitiendo utilizar valores de las variables temperatura, potencia media móvil, CCR-CO y presión total. Se valora el desempeño de la técnica de control escogida ante un aumento de la presión total provocado por cierre del dámper sin acción correctora del operador.

Capítulo 2. Diseño de un controlador borroso para control dinámico de los gases de extracción en el interior del HAE

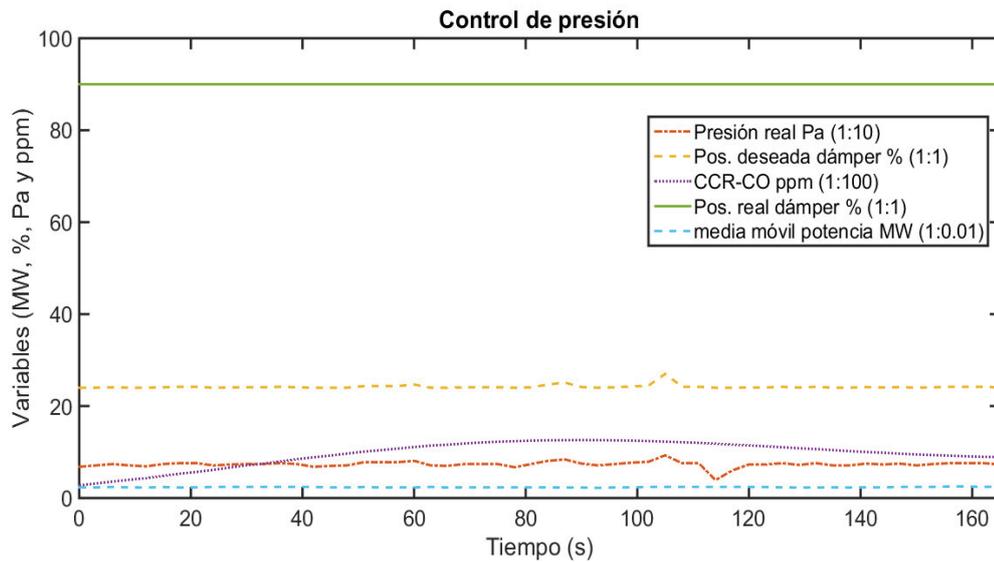


Figura 2.13 Simulación experimento 4

En caso de apertura total del dâmpner la presión disminuyó notablemente y el control diseñado ajusta la apertura del dâmpner cerca del 25%, contrarrestando esta situación crítica.

Descripción del experimento 5

Se realiza experimento con datos de la colada 14024 de fecha 24 de julio de 2021 hora de comienzo 12:03:00 pm y hora de finalización 2:30:47 pm. Se analiza con extracto de datos desde 2:25.02 pm hasta 2:28:02 pm. Se establece un período de muestreo de 3s, permitiendo utilizar valores de las variables media móvil de la potencia, CCR-CO y presión total. Se valora el desempeño de la técnica de control escogida ante un aumento de la presión total provocado por el cierre total del dâmpner.

Capítulo 2. Diseño de un controlador borroso para control dinámico de los gases de extracción en el interior del HAE

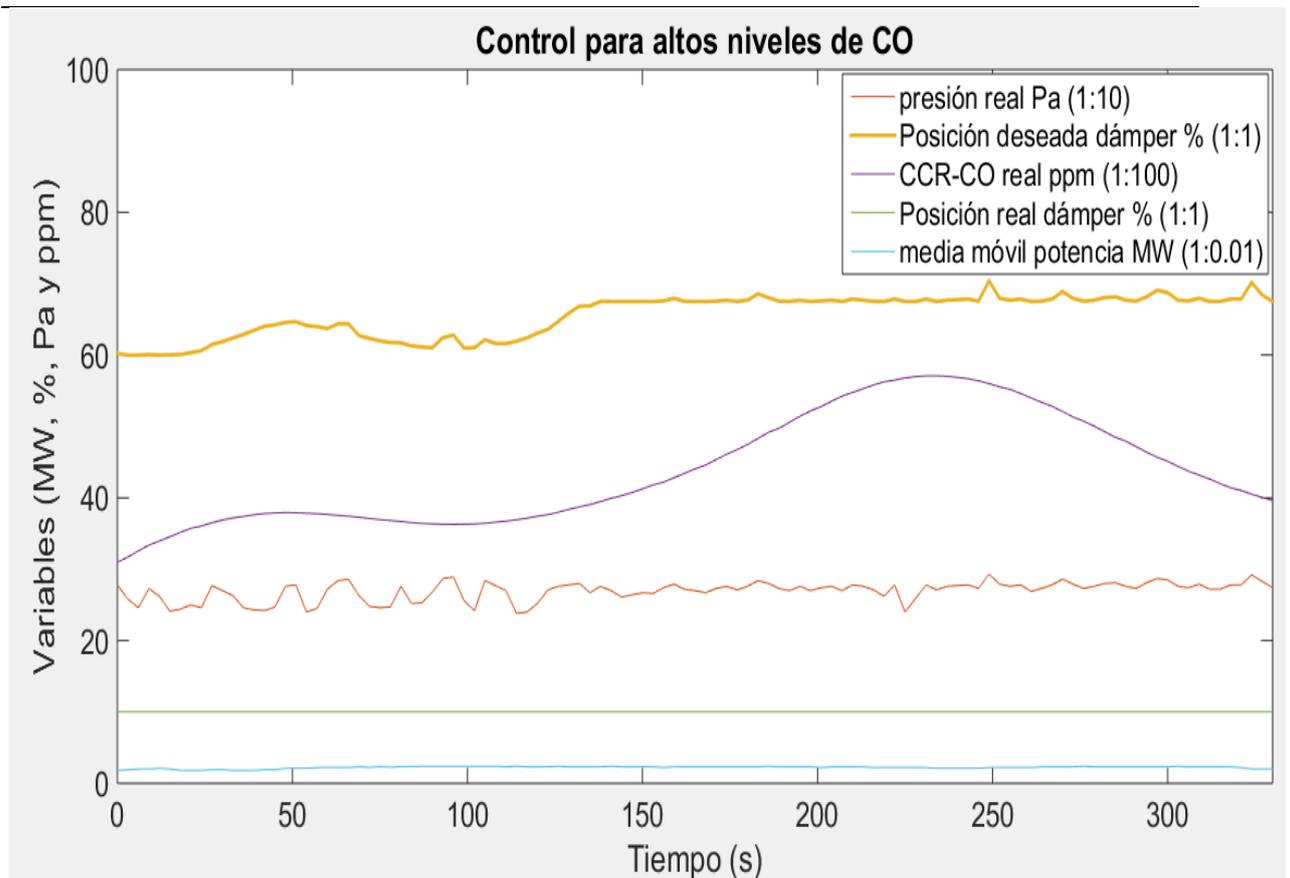


Figura 2.14 Simulación del experimento 5

Para actuar sobre altos niveles de CO el sistema diseñado actúa eficazmente como se muestra en la figura, regulando el contenido de CO de forma efectiva cumplimos el tercer objetivo de control.

2.3 VALORACIÓN DE LOS RESULTADOS ALCANZADOS

Los resultados alcanzados a nivel de simulación cumplen los objetivos de control, los expertos y especialista realizan una valoración de buena reflejada en el anexo XX. El aporte realizado por el trabajo es significativo, actualmente no existe control dinámico de los gases de extracción, que se evacúan de forma totalmente manual y sin ninguna relación físico-química con el proceso, entonces se valora como una aporte científico y práctico de suma importancia, para lograr niveles de automatización aceptables.

Capítulo 2. Diseño de un controlador borroso para control dinámico de los gases de extracción en el interior del HAE

2.3.1 ANÁLISIS VALORATIVO DE LOS ASPECTOS ECONÓMICOS Y MEDIOAMBIENTALES.

En correspondencia con las bibliografías consultadas desde el punto de vista medioambiental aseguramos con la investigación lograr un lugar de trabajo seguro, reducir las emisiones de gases nocivos y proteger los filtros de mangas ante altas temperaturas. No obstante para implementar la investigación es necesario contar con los siguientes materiales (tabla 2.6):

Equipamiento o sensor	Costo en el mercado internacional USD
Cilindros ISO/VDMA Serie C95	300
Termopar para mediciones de temperatura de gases de combustión Con vaina modelo TW81 Modelo TC81	80-100
Analizador de gases	20,000.00-30,000.00
Otros (cable, computadora)	1,000.00
Total	22,000-32,000.00

Considerado en nuestro país una suma importante de dinero, siguiendo y considerando las afirmaciones de la bibliografía consultada el aporte sería cubierto en el primer año de funcionamiento.

CONCLUSIONES

Las simulaciones demostraron con el cumplimiento de los objetivos de control que es eficaz el uso de un controlador borroso. Las acciones de los operadores distan mucho de lo que se puede lograr con un sistema de control, además, que los experimentos demostraron que se pueden adquirir mayores conocimientos del proceso y ser una fuente de próximas investigaciones.

El costo de la implementación es relativamente alto para nuestro país, pero que si nos guiamos por la experiencia en la fábrica de poner en práctica las innovaciones y las afirmaciones realizadas en la bibliografía estudiada es una inversión provechosa a largo plazo.

CONCLUSIONES

Valorando de forma positiva la investigación y dado los resultados obtenidos mediante simulaciones el primer aporte es la obtención de un sistema de control para la extracción de los gases del interior del HAE. La investigación lleva implícita que la implementación de dicho sistema de control regularía las emisiones de gases nocivos en la fábrica, se regularía de forma eficiente la extracción de los gases dando paso a una optimización del funcionamiento del horno en cuanto a, tiempo de trabajo, pérdidas de energía por dichos gases y gasto de materiales e insumos.

Los expertos también adquirieron datos importantes del comportamiento del proceso de fundición, resultando importante la apreciación que es posible la regulación de extracción de gases, mantener niveles menores del 1 % de concentración de CO y disminuir la temperatura y la energía de los gases evacuados.

Desde el punto de vista negativo, podemos afirmar que sería un control más completo si se utiliza el N₂ en sustitución del CO, según lo estudiado en la bibliografía. Aporta desde el punto de vista metalúrgico la calidad del proceso y el comportamiento del HAE, como oxidante o reductor, clave en la eficiencia y productividad del mismo. No obstante, nuestra investigación demuestra que es posible reducir una extracción excesiva, minimizando las condiciones de oxidación.

RECOMENDACIONES

La investigación es pionera en el tema de control dinámico de los gases de extracción, por tanto, es recomendable seguir el estudio en el campo, buscar soluciones afines. Es necesario y recomendable utilizar la concentración de N₂ en los gases para el control.

En la actualidad, el esfuerzo en los HAE, desde el punto de vista energético, se centra en disminuir el consumo total de energía más que en recuperar la energía perdida, por tanto es recomendable recuperar el calor que fluye a través del conducto. Se estima que la producción de vapor es la mejor alternativa para la recuperación de calor. Entre otras razones están las siguientes:

- El vapor puede usarse para diversos propósitos (vapor de proceso, calentamiento, operación de compresores, generación de energía eléctrica).
- Puede tener un rango amplio de temperaturas (como las temperaturas del gas de escape, las temperaturas del vapor pueden ser variables).
- Es relativamente fácil de transportar.
- El agua es una base barata y no tóxica.
- Se trata de una tecnología probada.

BIBLIOGRAFÍA

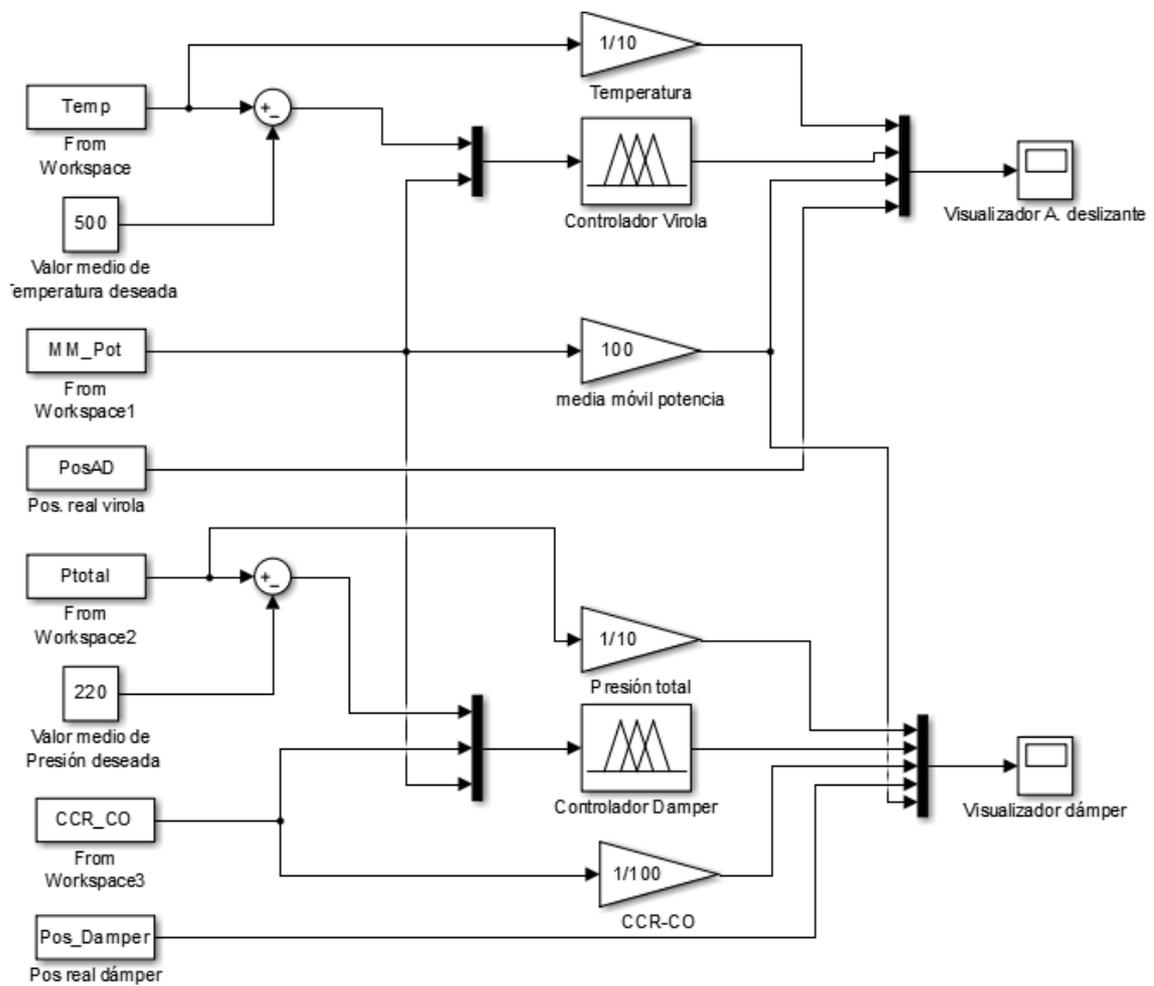
- [1] J. Madías, "El impacto de las recientes innovaciones en los hornos eléctricos de arco," *Metallon, Argentina, abr-2013*, 2013.
- [2] A. Hasannia and H. Esteki, "Fuzzy Control of an Electric Arc Furnace Off-Gas Process," in *ASME 2008 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, 2008, pp. 471-477.
- [3] A. Boiler, *ASME Boiler and Pressure Vessel Code: An International Code*: American Society of Mechanical Engineers New York, 1998.
- [4] D. Tolazzi, S. Marcuzzi, and S. Beorchia, "LINDARC™ EAF off-gas analysis system-installation at Gerdau Ameristeel Jacksonville (Florida–USA)," in *AisTech Conference Indianapolis (USA)*, 2011.
- [5] M. Kirschen, H. Pfeifer, F. Wahlers, and H. Mees, "Off-gas measurements for mass and energy balances of a stainless steel EAF," in *ELECTRIC FURNACE CONFERENCE*, 2001, pp. 737-748.
- [6] J. Bekker, I. Craig, and P. Pistorius, "Model predictive control of an electric arc furnace off-gas process," *Control Engineering Practice*, vol. 8, pp. 445-455, 2000.
- [7] G. GONZÁLEZ YERO, "MODELADO Y CONTROL DE NIVEL EN UN MOLDE DE VACIADO CONTINUO," 2017.
- [8] M. M. Susana ARAD, Dragos PASCULESCU, Codrut PETRILEAN, "ASPECTS OF THE ELECTRIC ARC FURNACE CONTROL," 2010.
- [9] A. M. S. J. Jaime Enrique Cervantes Fernández, Mauricio Márquez Santos, César Luis Barraza Botet, Jimmy Unfried Silgado, "Diseño mecánico de un horno de fusión al arco eléctrico con atmósfera controlada para la fabricación de aleaciones metálicas," *Prospect. No. 2, Julio - Diciembre de 2013*, , vol. Vol. 11 pp. págs. 21-29, 2013.
- [10] J. A. Jones, B. Bowman, and P. Lefrank, "Electric arc furnace steelmaking," *Steelmaking and Refining Volume, The AIST Steel Foundation, Pittsburgh, PA*, 1998.
- [11] J. Madías, "Electric Arc Furnace," *Ironmaking and Steelmaking Processes: Greenhouse Emissions, Control, and Reduction*, 2013.
- [12] A. Luzón-Cervantes, I. Bausa-Ortiz, and G. O. Borges-Ortiz, "CONTROL PREDICTIVO EN UN FERMENTADOR NO LINEAL," *Ciencia en su PC*, pp. 86-95, 2010.
- [13] S. U. Nimbalkar, A. Thekdi, J. R. Keiser, and J. M. Storey, "Preliminary Results from Electric Arc Furnace Off-Gas Enthalpy Modeling," Oak Ridge National Lab.(ORNL), Oak Ridge, TN (United States)2015.
- [14] D. J. Zuliani and V. Scipolo, "The Importance of Full Spectrum Off-Gas Analysis for EAF Process Control, Optimization & Safety," in *11th European Electric Steelmaking Conference*, 2016.
- [15] U. Kogelschatz, "Atmospheric-pressure plasma technology," *Plasma Physics and Controlled Fusion*, vol. 46, p. B63, 2004.
- [16] J. Astigarraga Urquiza, "Hornos de arco para fusión de Acero," ed: Bogotá, Colombia: MCGRAW-HILL, 1999.
- [17] M. Kirschen, V. Velikorodov, H. Pfeifer, R. Kühn, S. Lenz, J. Loh, *et al.*, "Off-gas measurements at the EAF primary dedusting system," *EEC*, 2005.
- [18] J. A. Jones, "Interactions between electric arc furnace operations and environmental concerns," *Iron and Steel Engineer*, vol. 72, 1995.
- [19] J. A. T. Jones, Bowman, B., & Lefrank, P.A., "Electric furnace steelmaking. The making, shaping and treating of steel, RJ Fruehan (ed.),," vol. 11th edition, *Steelmaking and refining volume*, AISE Steel Foundation, Pittsburgh., 1998.

- [20] C. Petersohn, Burstrom, E., & Hahlin, P., "Mefarc – a dynamic process control system for electric arc furnaces," 1992.
- [21] J. G. Bekker, I. K. Craig, and P. C. Pistorius, "Modeling and simulation of an electric arc furnace process," *ISIJ international*, vol. 39, pp. 23-32, 1999.
- [22] U. P. S.C. Jepson.
- [23] J. G. Bekker, "Modelling and control of an electric arc furnace off-gas process," University of Pretoria, 2008.
- [24] J. Maiolo and P. Clerci, "iEAF Technology: dynamic process control for the electric arc furnace," *AISTech*, 2009.
- [25] R. Haber, "CONTROL BORROSO."
- [26] E. H. Mamdani and S. Assilian, "An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller," *International journal of man-machine studies*, vol. 7, pp. 1-13, 1975.
- [27] J. Andújar, A. Barragán, M. Gegúndez, and M. Maestre, "Control borroso multivariable basado en heurística. Un caso práctico: grúa porta contenedores," *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI*, vol. 4, pp. 81-89, 2007.
- [28] T. Takagi and M. Sugeno, "Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control," *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics*, pp. 116-132, 1985.
- [29] T. del Cerro Sánchez and P. Novalbos, "Logica Difusa," *Universidad Carlos III de Madrid*, vol. 8, 2014.
- [30] P. Albertos Pérez and A. Sala Piqueras, "El control borroso: una metodología integradora," *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, vol. 1, pp. 22-31, 2010.

ANEXOS

ANEXO 1

Diseño en Simulink para la realización de las simulaciones.



Act
Ve a

ANEXO 2

Datos experimento 1

Tiempo (s)	Temperatura (°C)				
0	678	111	806	228	776
3	683	114	810	231	784
6	687	117	813	234	792
9	690	120	816	237	799
12	691	123	818	240	803
15	690	126	820	243	805
18	688	129	820	246	806
21	686	132	819	249	807
24	687	135	816	252	807
27	690	138	810	255	807
30	696	141	802	258	808
33	702	144	793	261	812
36	708	147	783	264	818
39	713	150	772	267	826
42	718	153	765	270	834
45	725	156	758	273	842
48	734	159	751	276	850
51	742	162	745	279	859
54	748	165	740	282	870
57	755	168	736	285	879
60	763	171	736	288	889
63	770	174	740	291	898
66	775	177	748	294	905
69	780	180	755	297	910
72	784	183	760	300	916
75	787	186	761	303	924
78	789	189	762	306	932
81	793	192	763	309	940
84	798	195	766	312	950
87	800	198	769	315	960
90	800	201	771	318	967
93	796	204	772	321	972
96	792	207	769	324	975
99	791	210	764	327	977
102	794	213	759	330	978
105	799	216	758	333	979
108	803	219	759	336	979
		222	762	339	980
		225	768	342	981

345	983
348	985
351	986
354	987
357	988
360	989
363	990
366	990
369	988
372	985
375	983
378	982

381	982
384	983
387	984
390	986
393	987
396	988
399	988
402	987
405	987
408	987
411	988
414	988

417	989
420	991
423	994
426	997
429	1001
432	1006
435	1010
438	1013
441	1014
444	1012

Tiempo (s)	media m. potencia (MW)
0	0,011
3	0,011
6	0,011
9	0,011
12	0,011
15	0,010
18	0,010
21	0,010
24	0,010
27	0,010
30	0,011
33	0,011
36	0,011
39	0,011
42	0,011
45	0,011
48	0,011
51	0,011
54	0,011
57	0,011
60	0,010
63	0,011
66	0,011
69	0,012

72	0,012
75	0,013
78	0,014
81	0,015
84	0,016
87	0,018
90	0,019
93	0,018
96	0,020
99	0,020
102	0,021
105	0,022
108	0,022
111	0,022
114	0,022
117	0,023
120	0,023
123	0,024
126	0,023
129	0,024
132	0,024
135	0,023
138	0,024
141	0,024
144	0,024
147	0,024
150	0,024

153	0,025
156	0,026
159	0,025
162	0,026
165	0,026
168	0,026
171	0,027
174	0,027
177	0,027
180	0,028
183	0,028
186	0,027
189	0,028
192	0,027
195	0,028
198	0,028
201	0,027
204	0,028
207	0,027
210	0,027
213	0,026
216	0,027
219	0,027
222	0,028
225	0,027
228	0,027
231	0,028

234	0,028
237	0,028
240	0,027
243	0,028
246	0,028
249	0,028
252	0,028
255	0,029
258	0,028
261	0,028
264	0,028
267	0,028
270	0,029
273	0,029
276	0,028
279	0,028
282	0,028
285	0,027
288	0,028
291	0,028
294	0,027
297	0,028
300	0,028
303	0,027

306	0,028
309	0,028
312	0,027
315	0,028
318	0,028
321	0,027
324	0,028
327	0,028
330	0,027
333	0,029
336	0,028
339	0,028
342	0,028
345	0,028
348	0,028
351	0,029
354	0,028
357	0,028
360	0,029
363	0,027
366	0,028
369	0,028
372	0,029
375	0,028

378	0,028
381	0,028
384	0,028
387	0,028
390	0,028
393	0,028
396	0,028
399	0,028
402	0,027
405	0,028
408	0,028
411	0,027
414	0,028
417	0,028
420	0,028
423	0,028
426	0,028
429	0,028
432	0,028
435	0,028
438	0,028
441	0,028
444	0,028

Tiempo (s)	Media móvil de la potencia (MW)
0	0,014
3	0,014
6	0,014
9	0,013
12	0,014
15	0,014
18	0,013
21	0,013
24	0,013
27	0,013
30	0,012
33	0,011
36	0,010

39	0,009
42	0,007
45	0,006
48	0,005
51	0,004
54	0,003
57	0,002
60	0,001
63	0,001
66	0,001
69	0,001
72	0,001
75	0,001
78	0,001
81	0,001
84	0,001

87	0,001
90	0,001
93	0,001
96	0,001
99	0,001
102	0,001
105	0,000
108	0,000
111	0,000
114	0,000
117	0,000
120	0,000
123	0,000
126	0,000
129	0,000
132	0,000

135	0,000
138	0,000
141	0,000
144	0,000
147	0,000
150	0,000
153	0,000
156	0,000
159	0,000
162	0,000
165	0,000
168	0,000
171	0,000
174	0,000
177	0,000
180	0,000
183	0,000
186	0,000
189	0,000
192	0,000
195	0,000
198	0,000
201	0,000
204	0,000
207	0,000
210	0,000
213	0,000
216	0,000

219	0,000
222	0,000
225	0,001
228	0,001
231	0,002
234	0,002
237	0,003
240	0,004
243	0,005
246	0,005
249	0,006
252	0,007
255	0,007
258	0,008
261	0,007
264	0,009
267	0,008
270	0,008
273	0,008
276	0,009
279	0,009
282	0,009
285	0,009
288	0,009
291	0,010
294	0,009
297	0,010
300	0,010

303	0,010
306	0,010
309	0,010
312	0,010
315	0,010
318	0,011
321	0,011
324	0,011
327	0,012
330	0,012
333	0,012
336	0,013
339	0,013
342	0,014
345	0,014
348	0,014
351	0,014
354	0,015
357	0,014
360	0,015
363	0,016
366	0,015
369	0,016
372	0,016
375	0,017

Tiempo(s)	Temperatura (°C)
0	511
3	513
6	513
9	512
12	510
15	509
18	507
21	504
24	500
27	495

30	489
33	482
36	474
39	469
42	463
45	458
48	454
51	449
54	445
57	441
60	438
63	435

66	433
69	432
72	432
75	432
78	433
81	433
84	434
87	435
90	436
93	438
96	440
99	443

102	444	195	363	288	340
105	444	198	363	291	341
108	442	201	363	294	342
111	439	204	362	297	343
114	437	207	362	300	343
117	434	210	362	303	342
120	431	213	362	306	339
123	428	216	361	309	336
126	424	219	360	312	335
129	419	222	360	315	335
132	412	225	360	318	334
135	406	228	360	321	333
138	401	231	360	324	333
141	394	234	360	327	333
144	383	237	360	330	332
147	373	240	358	333	331
150	364	243	355	336	330
153	358	246	351	339	328
156	356	249	349	342	326
159	358	252	346	345	324
162	363	255	343	348	323
165	367	258	341	351	321
168	369	261	339	354	319
171	370	264	337	357	317
174	372	267	336	360	315
177	374	270	336	363	312
180	376	273	335	366	310
183	374	276	335	369	311
186	371	279	336	372	313
189	367	282	337	375	318
192	364	285	339		

Datos experimento 3

Tiempo (s)	Presión Total (Pa)
0	278
3	277
6	277
9	276
12	268
15	272

18	272
21	270
24	270
27	263
30	264
33	272
36	273
39	268

42	259
45	252
48	275
51	278
54	283
57	273
60	277
63	264

66	272
69	276
72	274
75	277
78	276
81	265
84	270
87	267
90	278
93	313
96	386
99	400
102	397
105	402
108	401
111	395

114	394
117	398
120	395
123	395
126	399
129	396
132	394
135	398
138	401
141	400
144	397
147	394
150	395
153	402
156	394
159	324

162	284
165	264
168	271
171	270
174	281
177	268
180	277
183	277
186	282
189	279
192	234
195	252
198	274
201	275

Tiempo(s)	CCR-CO (Pa)
0	2090
3	1997
6	1913
9	1838
12	1742
15	1646
18	1570
21	1485
24	1390
27	1298
30	1237
33	1148
36	1062
39	988
42	927
45	854
48	784
51	734
54	679
57	624
60	573
63	543

66	500
69	463
72	433
75	410
78	384
81	362
84	348
87	332
90	316
93	310
96	305
99	303
102	303
105	305
108	310
111	315
114	321
117	331
120	342
123	351
126	362
129	376
132	391

135	402
138	418
141	434
144	452
147	463
150	481
153	498
156	513
159	526
162	543
165	559
168	570
171	583
174	597
177	609
180	618
183	628
186	638
189	647
192	652
195	659
198	664
201	670

Tiempo (s)	Media mov. Potencia (MW)
0	0,033
3	0,033
6	0,032
9	0,032
12	0,031
15	0,030
18	0,029
21	0,027
24	0,026
27	0,026
30	0,024
33	0,023
36	0,024
39	0,023
42	0,022
45	0,022
48	0,022
51	0,022
54	0,023
57	0,022
60	0,022

63	0,022
66	0,022
69	0,022
72	0,023
75	0,023
78	0,023
81	0,023
84	0,022
87	0,023
90	0,023
93	0,023
96	0,023
99	0,023
102	0,022
105	0,023
108	0,024
111	0,024
114	0,024
117	0,023
120	0,024
123	0,023
126	0,023
129	0,023
132	0,024

135	0,023
138	0,023
141	0,023
144	0,023
147	0,023
150	0,023
153	0,024
156	0,023
159	0,023
162	0,023
165	0,023
168	0,022
171	0,023
174	0,023
177	0,023
180	0,022
183	0,023
186	0,023
189	0,023
192	0,023
195	0,024
198	0,024
201	0,023

Datos experimento 4

Tiempo (s)	Media mov. Potencia (MW)
0	0,023
3	0,023
6	0,024
9	0,023
12	0,023
15	0,024
18	0,023
21	0,023
24	0,024
27	0,024

30	0,024
33	0,024
36	0,024
39	0,024
42	0,024
45	0,023
48	0,023
51	0,024
54	0,023
57	0,023
60	0,023
63	0,024
66	0,023
69	0,023

72	0,023
75	0,023
78	0,023
81	0,023
84	0,023
87	0,023
90	0,023
93	0,022
96	0,023
99	0,023
102	0,024
105	0,024
108	0,024
111	0,024

114	0,024
117	0,024
120	0,024
123	0,024
126	0,023
129	0,023
132	0,023
135	0,023
138	0,023
141	0,023
144	0,023
147	0,024
150	0,024

153	0,024
156	0,025
159	0,025
162	0,024
165	0,025
168	0,025
171	0,024
174	0,025
177	0,024
180	0,024
183	0,025
186	0,024
189	0,024

192	0,025
195	0,024
198	0,024
201	0,025
204	0,024
207	0,024
210	0,025
213	0,024
216	0,025
219	0,025
222	0,024

Tiempo (s)	CCR-CO (ppm)
0	277
3	317
6	359
9	398
12	434
15	482
18	530
21	568
24	613
27	663
30	714
33	747
36	797
39	845
42	888
45	924
48	968
51	1010
54	1041
57	1075
60	1110
63	1142
66	1161
69	1186

72	1209
75	1225
78	1237
81	1249
84	1256
87	1259
90	1261
93	1260
96	1255
99	1250
102	1240
105	1227
108	1214
111	1201
114	1182
117	1162
120	1146
123	1127
126	1105
129	1082
132	1066
135	1043
138	1021
141	1002
144	987
147	966

150	948
153	935
156	922
159	908
162	897
165	890
168	882
171	878
174	875
177	875
180	877
183	880
186	884
189	891
192	900
195	912
198	920
201	934
204	949
207	964
210	977
213	994
216	1012
219	1027
222	1043

Tiempo (s)	Presión Total (Pa)
0	68
3	71
6	74
9	71
12	69
15	74
18	76
21	76
24	71
27	73
30	74
33	74
36	76
39	74
42	68
45	70
48	71
51	78
54	78
57	78
60	81
63	71
66	70
69	74

72	74
75	74
78	67
81	74
84	81
87	84
90	75
93	71
96	74
99	77
102	79
105	93
108	76
111	76
114	39
117	60
120	73
123	73
126	76
129	72
132	76
135	71
138	71
141	75
144	73
147	75

150	71
153	74
156	76
159	76
162	76
165	73
168	73
171	81
174	76
177	76
180	82
183	81
186	74
189	72
192	76
195	109
198	99
201	79
204	90
207	68
210	96
213	73
216	68
219	71
222	92

Datos experimento 5

Tiempo (s)	Media móv. potencia (MW)
0	0,018
3	0,019
6	0,020
9	0,020
12	0,021
15	0,020
18	0,018
21	0,018
24	0,018

27	0,019
30	0,019
33	0,018
36	0,018
39	0,018
42	0,019
45	0,019
48	0,021
51	0,021
54	0,021
57	0,022
60	0,022
63	0,022

66	0,022
69	0,023
72	0,022
75	0,023
78	0,022
81	0,024
84	0,024
87	0,024
90	0,024
93	0,024
96	0,024
99	0,024
102	0,024

105	0,024
108	0,024
111	0,023
114	0,024
117	0,023
120	0,023
123	0,023
126	0,024
129	0,023
132	0,023
135	0,023
138	0,023
141	0,024
144	0,023
147	0,023
150	0,023
153	0,023
156	0,022
159	0,023
162	0,023
165	0,023
168	0,023
171	0,023
174	0,023
177	0,023

180	0,023
183	0,023
186	0,024
189	0,023
192	0,023
195	0,023
198	0,023
201	0,022
204	0,023
207	0,023
210	0,023
213	0,023
216	0,022
219	0,022
222	0,022
225	0,022
228	0,022
231	0,022
234	0,021
237	0,021
240	0,021
243	0,021
246	0,021
249	0,022
252	0,022

255	0,022
258	0,022
261	0,022
264	0,023
267	0,023
270	0,023
273	0,023
276	0,024
279	0,023
282	0,023
285	0,023
288	0,023
291	0,023
294	0,023
297	0,023
300	0,023
303	0,024
306	0,023
309	0,023
312	0,023
315	0,023
318	0,023
321	0,022
324	0,020
327	0,020

Tiempo (s)	Presión total (Pa)
0	278
3	258
6	246
9	273
12	262
15	241
18	244
21	250
24	246
27	277
30	270
33	263

36	246
39	243
42	242
45	247
48	276
51	278
54	240
57	245
60	272
63	284
66	286
69	263
72	248
75	246

78	247
81	276
84	252
87	253
90	268
93	287
96	289
99	256
102	242
105	284
108	277
111	270
114	238
117	240

120	252
123	271
126	276
129	278
132	280
135	267
138	276
141	270
144	261
147	264
150	267
153	266
156	274
159	279
162	272
165	270
168	267
171	273
174	276
177	271
180	276
183	284
186	280
189	273

192	270
195	276
198	270
201	274
204	276
207	270
210	278
213	276
216	271
219	262
222	278
225	240
228	259
231	278
234	271
237	276
240	277
243	278
246	273
249	293
252	279
255	276
258	278
261	269

264	273
267	278
270	286
273	279
276	273
279	276
282	280
285	281
288	276
291	273
294	281
297	287
300	285
303	276
306	274
309	279
312	272
315	272
318	278
321	278
324	292
327	283

Tiempo (s)	Media móv. Potencia (MW)
0	3099
3	3170
6	3257
9	3337
12	3394
15	3455
18	3517
21	3572
24	3605
27	3650

30	3689
33	3718
36	3739
39	3762
42	3780
45	3788
48	3793
51	3791
54	3784
57	3778
60	3767
63	3754
66	3742

69	3728
72	3711
75	3694
78	3682
81	3668
84	3653
87	3641
90	3635
93	3630
96	3629
99	3630
102	3634
105	3643

108	3659
111	3673
114	3692
117	3715
120	3743
123	3764
126	3799
129	3838
132	3873
135	3905
138	3948
141	3993
144	4029
147	4074
150	4125
153	4181
156	4220
159	4280
162	4344
165	4404
168	4459
171	4534
174	4611
177	4674
180	4747

183	4832
186	4917
189	4974
192	5059
195	5143
198	5217
201	5278
204	5353
207	5424
210	5477
213	5529
216	5581
219	5625
222	5649
225	5679
228	5699
231	5708
234	5709
237	5703
240	5687
243	5668
246	5639
249	5601
252	5554
255	5520

258	5462
261	5399
264	5338
267	5282
270	5209
273	5132
276	5073
279	5005
282	4927
285	4849
288	4795
291	4717
294	4639
297	4570
300	4512
303	4440
306	4372
309	4319
312	4262
315	4199
318	4141
321	4103
324	4051
327	4006

ANEXO 3

Reglas para sistema de inferencia borrosa de abertura deslizante

Rule No.	Error Temp.	MM	Pos.
	Gases	Potencia	Virola
1	Baja	Baja	0
2	Baja	Media	0
3	Baja	Alta	0
4	Normal	Baja	10
5	Normal	Media	20
6	Normal	Alta	30
7	Alta	Baja	40
8	Alta	Media	60
9	Alta	Alta	80

Reglas para sistema de inferencia borrosa del dámper

Rule No.	Pres. Gases	CCR-CO	MM Potencia	Pos. Dámper
1	Baja	Baja	Baja	20
2	Baja	Baja	Normal	24
3	Baja	Baja	Alta	28
4	Baja	Normal	Baja	30
5	Baja	Normal	Normal	34
6	Baja	Normal	Alta	38
7	Baja	Alta	Baja	40
8	Baja	Alta	Normal	44
9	Baja	Alta	Alta	48
10	Normal	Baja	Baja	50
11	Normal	Baja	Normal	55
12	Normal	Baja	Alta	35
13	Normal	Normal	Baja	45
14	Normal	Normal	Normal	45
15	Normal	Normal	Alta	55
16	Normal	Alta	Baja	60
17	Normal	Alta	Normal	62,5
18	Normal	Alta	Alta	65
19	Alta	Baja	Baja	72,5
20	Alta	Baja	Normal	72,5
21	Alta	Baja	Alta	75
22	Alta	Normal	Baja	80
23	Alta	Normal	Normal	82,5
24	Alta	Normal	Alta	85
25	Alta	Alta	Baja	90
26	Alta	Alta	Normal	95
27	Alta	Alta	Alta	97.5