

**AUTOMATIZACIÓN DEL PROCESO DE ADICIÓN DE CALIZA PARA
MEJORAR LA EFICIENCIA EN LA CALDERA DE UNA CENTRAL
TERMOELÉCTRICA QUE PERMITA DISMINUIR EL IMPACTO AMBIENTAL A
PARTIR DE UNA REDUCCIÓN EN LA PRODUCCIÓN DE CENIZA**

EFRÉN DAVID DÍAZ CALDERA

DARWIN ALFONSO QUINTERO RUIZ

JOHN ELKIN QUINTERO ROJAS

**UNIVERSIDAD NACIONAL ABIERTA Y A DISTANCIA – UNAD
ESCUELA DE CIENCIAS BÁSICAS TECNOLOGÍA E INGENIERÍA**

INGENIERIA ELECTRONICA

SAHAGÚN

2019

**AUTOMATIZACIÓN DEL PROCESO DE ADICIÓN DE CALIZA PARA
MEJORAR LA EFICIENCIA EN LA CALDERA DE UNA CENTRAL
TERMOELÉCTRICA QUE PERMITA DISMINUIR EL IMPACTO AMBIENTAL A
PARTIR DE UNA REDUCCIÓN EN LA PRODUCCIÓN DE CENIZA**

EFRÉN DAVID DÍAZ CALDERA

DARWIN ALFONSO QUINTERO RUIZ

JOHN ELKIN QUINTERO ROJAS

Trabajo de grado para optar por el título de:

Ingeniero Electrónico

Director del Proyecto:

Ing. Mariano Esteban Romero Torres

**UNIVERSIDAD NACIONAL ABIERTA Y A DISTANCIA – UNAD
ESCUELA DE CIENCIAS BÁSICAS TECNOLOGÍA E INGENIERÍA**

INGENIERIA ELECTRONICA

SAHAGÚN

2019

Las ideas y contenido expresados en el presente documento son de exclusiva responsabilidad de sus autores y no comprometen la ideología de la Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD.

Debido a las políticas de confidencialidad de la información propias de la empresa bajo estudio, no se permite divulgar el nombre real de esta compañía, por lo que en adelante esta se conocerá bajo el seudónimo de “Térmica 1”.

Nota de aceptación

Firma del director del proyecto

Firma del jurado 1

Firma del jurado 2

Montelíbano, agosto de 2019

CONTENIDO

RESUMEN.....	10
ABSTRACT.....	12
INTRODUCCIÓN.....	13
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	15
1.1. DESCRIPCIÓN.....	15
1.2. FORMULACIÓN.....	16
1.3. OBJETIVOS.....	17
1.4. JUSTIFICACIÓN.....	18
1.5. ALCANCE.....	19
2. MARCO REFERENCIAL.....	20
2.1. ANTECEDENTES.....	20
2.2. MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL.....	21
2.3. MARCO LEGAL.....	32
3. DISEÑO METODOLÓGICO.....	34
3.1. MÉTODO DE ESTUDIO.....	34
3.2. POBLACIÓN Y MUESTRA.....	34
3.3. FUENTES DE INFORMACIÓN.....	35
3.4. TÉCNICAS Y RECOLECCIÓN DE LA INFORMACIÓN.....	36
4. RESULTADOS.....	37
4.1. IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES.....	37
4.2. MODELO MATEMÁTICO DEL SISTEMA.....	40
4.3. DISEÑO DEL CONTROLADOR.....	41

5.	CONCLUSIONES	61
6.	RECOMENDACIONES.....	63
	BIBLIOGRAFIA.....	64
	ANEXOS	67

LISTADO DE TABLAS

	Pagina
Tabla 1. Efecto de los controladores PID en el sistema de circuito cerrado	27
Tabla 2. Estándares de emisión admisibles de contaminantes al aire para centrales térmicas existentes con capacidad instalada igual o superior a 20 MW por tipo de combustible, a condiciones de referencia (25° C, 760 mm Hg).....	33
Tabla 3. Tabulación de datos de las emisiones en modo manual y modo automático	53

LISTADO DE FIGURAS

	Pagina
Figura 1. Esquema de la adición de la caliza en la planta térmica.....	23
Figura 2. Diagrama de bloques de un sistema en lazo cerrado	26
Figura 3. Sistema en lazo cerrado	26
Figura 4. Calderas de lecho fluidificado	31
Figura 5. Respuesta al escalón.....	43
Figura 6. Obtención de variables sobre respuesta del sistema	44
Figura 7. Modelo aproximado de primer orden	46
Figura 8. Modelo aproximado de segundo orden.....	46
Figura 9. Diagrama de bloques del sistema.....	47
Figura 10. Simulación en <i>Simulink</i> con un escalón negativo con valor de 5.....	47
Figura 11. Simulación en <i>Simulink</i> con un Escalón positivo con valor de 10.....	48
Figura 12. Configuración de variables de simulación en software <i>Control Station</i>	50
Figura 13. Visualización de simulación del proceso en <i>Control Station</i>	51
Figura 14. Respuesta de la planta con control PID implementado ante variaciones del <i>SetPoint</i>	51
Figura 15. Grafica comparativa de emisiones en modo manual y modo automático	55
Figura 16. Interfaz con la cual se adiciona material de caliza pulverizado para el proceso de desulfuración de los gases.....	56
Figura 17. HMI del sistema de adición de caliza.....	57
Figura 18. Indicación de valores de emisiones de gases contaminantes presentes en el proceso (SO ₂ encerrado en rectángulo Amarillo).....	57
Figura 19. Pantalla emergente en la cual se indica el rango de valores de emisiones de SO ₂ en unidades de mg/m ³	58
Figura 20. Válvula rotativa para control de descarga manual del material sorbente, su uso es de forma manual, se realiza a criterio de cada operador encargado del proceso	58

Figura 21. Pantalla emergente en la cual se controla porcentualmente la velocidad de la válvula rotativa de forma manual59

Figura 22. Sistema de inyección de aire comprimido para la adición del material sorbente59

RESUMEN

El uso de un sistema de depuración de gases y partículas adecuado para cada industria es uno de los problemas más importantes en la actualidad, ya que es necesario combinar aspectos técnicos con limitaciones económicas y legales. Los procesos de desulfuración de gases (FGD) para remover SO_2 , generalmente se basan en su absorción esencialmente irreversible mediante soluciones alcalinas; en esta investigación se presenta una propuesta tecnológica basada en el método de cal o piedras caliza, el más usado en los procesos de combustión por carbón, debido a los altos grados de desulfuración alcanzados y a la abundancia de la materia prima en el mercado; esto se debe a que es un método sencillo de manejar, efectivo, confiable y barato (Velasco, 2005). Para efectos de este diseño, se presenta una propuesta alternativa de optimización a efecto de contribuir con las mejoras sobre la producción de energía con el novedoso sistema automatizado para la adición de caliza con una dosificación adecuada, para mejorar la eficiencia de la caldera en la central termoeléctrica y redundará en la disminución en la emisión de gases y partículas contaminantes que a su vez reducen el impacto al medio ambiente; con el diseño se presentan los protocolos de simulación experimentales y modelo matemático, con el cual se definirán como una descripción desde el punto de vista matemático, el hecho o fenómeno a aplicar en el mundo real, apoyados en datos primarios obtenidos del simulador y del comportamiento de las emisiones a partir de la implementación del mismo. De igual manera, se abordará la generación energética por vapor de agua, como una alternativa viable para el desarrollo, con la eficiencia pertinente causando una reducción de costos y aumento de la producción; Sin embargo, no se puede ocultar el hecho de que su generación trae consigo un gran impacto al medio ambiente, ya que el uso de combustibles fósiles como el petróleo o el carbón produce emisiones de *smog* fotoquímico, principalmente compuestos por dióxido de carbono CO_2 , dióxido de azufre SO_2 , óxido de nitrógeno NO_x y monóxido de carbono CO , entre otros. Por lo que se busca poder establecer

una dosificación adecuada en la adición de caliza y de esta manera poder aminorar la cantidad de material sorbente usado actualmente y contribuir en la reducción de la generación de cenizas.

ABSTRACT

The use of a gas and particle purification system suitable for each industry is one of the most important problems at present, since it is necessary to combine technical aspects with economic and legal limitations. The processes of desulfurization of gases (FGD) to remove SO_2 , are generally based on their essentially irreversible absorption by means of alkaline solutions; This research presents a technological proposal based on the lime or limestone method, the one most commonly used in coal combustion processes, due to the high degrees of desulfurization achieved and the abundance of the raw material in the market; This is because it is a simple method to manage, effective, reliable and cheap. For the purposes of this design, the alternative proposal of optimization is presented in order to contribute with the improvements on energy production with the new automated system for the addition of limestone with a suitable dosage, to improve the efficiency of the boiler in the plant thermoelectric and will result in a decrease in the emission of polluting gases and particles that in turn reduce the impact on the environment; with the design, the experimental simulation protocols and mathematical model are presented, with which they will be defined as a description from the mathematical point of view, the fact or phenomenon to be applied in the real world, supported by primary data obtained from the simulator and the behavior of emissions from the implementation thereof. Likewise, energy generation by steam will be addressed, as a viable alternative for development, with the relevant efficiency causing a reduction in costs and increased production; However, one can't hide the fact that their generation brings a great impact to the environment, since the use of fossil fuels such as oil or coal produces photochemical smog emissions, mainly composed of carbon dioxide CO_2 , sulfur dioxide SO_2 , nitrogen oxide NO_x and carbon monoxide CO , among others. For what is sought to be able to establish a suitable dosage in the addition of limestone and thus be able to reduce the amount of sorbent material currently used and contribute to the reduction of ash generation.

INTRODUCCIÓN

En Colombia la generación de energía eléctrica se ha convertido en un motor para el desarrollo económico y social, toda vez que la generación eléctrica se propone abastecer la demanda nacional. En los últimos años los gobiernos centrales han realizado grandes inversiones a fin de obtener la electricidad bajo la modalidad hidroeléctrico y termoeléctrico (Nieves Zárate & Hernandez Vidal, 2016); las termoeléctricas que, para su operatividad generalmente utilizan combustibles fósiles derivados del petróleo o en su defecto carbón para generar la combustión, irremediablemente generan cenizas, gases y elementos contaminantes, que durante el proceso son expulsados hacia la atmósfera, principalmente dióxido de carbono CO_2 , dióxido de azufre SO_2 , óxido de nitrógeno NO_x monóxido de carbono CO y material particulado; grupo de contaminantes que, aunque son monitoreados y en cierta forma controlados por departamentos creados para este efecto, tienen incidencia sobre el medio ambiente por los residuos nocivos que expulsan los cuales tienen un alto grado de responsabilidad en la ocurrencia del calentamiento global y afectación en la salud de los seres humanos.

En ese contexto, el presente proyecto propone un detallado diseño de un sistema automático de adición de caliza a fin de lograr una mejora considerable de la eficiencia de la caldera en la generación de energía por vapor de agua en una central termoeléctrica y de esta forma lograr la disminución en el impacto al medio ambiente toda vez que el proceso produce una reducción en la generación de ceniza, la problemática referente a la contaminación ambiental por producción de energía eléctrica y de sus elementos, deben estar alineados a la normatividad y la ley; además de permitir la constante búsqueda de nuevas técnicas de mejoramiento en la producción, paralelo a propuestas para la difusión de programas más amigables con el medio ambiente; haciendo énfasis en el análisis de la emisión de estos elementos contaminantes mediante el proceso de simulación y monitoreo del comportamiento por medio de un modelo matemático.

Este proyecto de grado se encuentra organizado en 6 capítulos, cuyo contenido se describe a continuación:

El capítulo 1 comprende el planteamiento del problema, aquí se realiza una detallada descripción de la problemática presente en una central termoeléctrica a raíz de una inadecuada aplicación de material sorbente en el proceso de desulfuración. En este capítulo están contenidos la formulación, objetivos, justificación, alcance y delimitación del proyecto.

El capítulo 2 contiene el marco referencial que soporta el proceso investigativo adelantado para este proyecto, se exponen todas las referencias bibliográficas que permitirán adquirir el conocimiento sobre métodos de desulfuración aplicados en procesos industriales.

En el capítulo 3 se describe los métodos y técnicas de investigación aplicadas al desarrollo del proyecto aplicado.

El capítulo 4 corresponde a los resultados que se obtendrán producto del desarrollo metodológico de este proyecto aplicado. Se realiza una clara identificación de las variables aplicadas al proyecto, realización del modelo matemático que da respuesta al diseño del controlador propuesto como solución para este proyecto. Finalmente se exponen las simulaciones que permiten demostrar la validez del controlador PID propuesto.

El capítulo 5 aquí se encuentra plasmadas las conclusiones obtenidas luego de desarrollar el presente proyecto aplicado.

Por último, tenemos el capítulo 6 en el cual se realizan recomendaciones puntuales sobre este proyecto.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. DESCRIPCIÓN

A continuación, se describe de manera general un problema real que se presenta en la central termoeléctrica Térmica 1 ubicada en la costa norte colombiana, para el proceso de producción de vapor y en su defecto producir energía, es necesaria la utilización de carbón en la combustión, pero el carbón utilizado en esta central tiene altas concentraciones de dióxido de sulfuro el cual es agente altamente contaminante. Para mitigar o disminuir este compuesto contaminante se utiliza la caliza como un elemento químico que neutraliza el dióxido de sulfuro producto de la combustión; la caliza pulverizada en proporción a la cantidad de carbón que se suministra captura el azufre del carbón y lo transforma en un residuo sólido que luego es extraído de la caldera a través de un mecanismo diseñado para tal labor.

Una de las tecnologías empleadas en la actualidad para la producción de energía a base de combustibles fósiles, es la quema de carbón en calderas de tipo lecho fluidizado circulante. Según (Caballero & Medico, 2013) la combustión en lecho fluidizado consiste en quemar el carbón mezclado con caliza en un lecho que se mantiene suspendido por la acción de un flujo controlado de aire. Con ello se logra retener el azufre contenido en el mineral, disminuyendo los agentes contaminantes como el SO_2 expulsados en los gases de la chimenea, los que al reaccionar con la cal son extraídos en forma de cenizas.

Actualmente se presenta una inadecuada operación en el proceso de desulfuración debido a una desmedida en la aplicación de polvo de caliza para la captura de las emisiones de dióxido de azufre SO_2 generadas durante el proceso de combustión dentro de la caldera. A causa de que no existe un sistema de control óptimo que permita dosificar la cantidad de caliza referenciado a la señal de emisiones de SO_2 , por lo que se busca diseñar un sistema de control automático que tome como

referencia la señal de emisiones, principalmente para controlar la adición del material sorbente, contribuyendo de esta forma con la disminución de los residuos generados en la caldera por la adición excesiva de dicho material.

También es importante mencionar que actualmente se generan grandes cantidades de cenizas, debido a la aplicación excesiva de caliza, representando un problema a la empresa en cuanto debe disponer de grandes áreas para la disposición de dichos residuos los cuales terminan generando un impacto al medio ambiente.

1.2. FORMULACIÓN

¿Cómo controlar la dosificación apropiada de caliza en una caldera de lecho fluidizado para capturar el dióxido de azufre SO_2 y disminuir la cantidad de caliza usada actualmente haciendo más eficiente el sistema en el proceso de combustión realizado en la central termoeléctrica?

1.3. OBJETIVOS

1.3.1 GENERAL

Proponer la automatización en el proceso de adición de caliza en una caldera de lecho fluidizado para mejorar la eficiencia en el proceso de combustión en la central termoeléctrica disminuyendo el consumo de caliza y a la vez contribuir en la disminución del impacto ambiental.

1.3.2 ESPECIFICOS

- ✓ Identificar las variables involucradas en la desulfuración en las calderas de tipo lecho fluidizado.
- ✓ Definir el modelo matemático para diseñar el controlador PID
- ✓ Diseñar un controlador PID que me permita controlar las emisiones de SO_2
- ✓ Realizar las simulaciones de la automatización del proceso para comprobar la disminución del impacto ambiental.

1.4. JUSTIFICACIÓN

En miras a contribuir en la reducción de la problemática ambiental presente a nivel mundial, por el aumento de emisiones contaminantes derivados de la quema de combustibles fósiles como el carbón, usados para la generación de energía y de cierta manera contribuir en la eficiencia operativa de la caldera, por lo que se propone una solución que permita mitigar el impacto ambiental generado en la central termoeléctrica.

Al desarrollar el sistema de control propuesto, se buscará que los gases que se emiten al ambiente se encuentren dentro de los rangos permitidos según la normatividad ambiental, más específicamente la resolución 909 de 2008 del ministerio del medio ambiente, en la que se establecen las normas y estándares de emisiones admisibles de contaminantes a la atmósfera por fuentes fijas. Igualmente se obtendrá una disminución en la producción de residuos derivados de la mezcla entre carbón y caliza propios del proceso de combustión. Con la implementación de este proyecto aplicado, se automatizará el proceso para la adición de caliza en una central termoeléctrica evitando la desmedida aplicación de caliza, en beneficio de aspectos ambientales y locativos referentes al acopio de residuos generados durante el proceso.

Para el logro de los resultados propuestos en la formulación del proyecto, es necesario una clara identificación de las variables involucradas en el proceso, que servirán como base para realizar los cálculos que permitirán el desarrollo del modelo matemático del sistema.

1.5. ALCANCE

Este proyecto abarca el diseño y dimensionamiento de un sistema automatizado necesario para controlar la adición de caliza en el proceso de desulfuración de SO_2 en una planta de generación de energía con sistema termoeléctrico por combustión con combustible fósil a base de carbón.

Para ello, se ha marcado como prioridad el mejoramiento de la eficiencia de la caldera, la reducción de costos por el excesivo uso del material adsorbente, el aumento en la capacidad de captura de gases contaminante y por ende la reducción en las emisiones de SO_2 . Por tanto, se necesitarán establecer nuevos protocolos de adición de sorbente (polvo de caliza), de acuerdo con la evaluación de resultados de simulación para comprender los fenómenos involucrados en el proceso de captura y las variables que determinan el proceso.

El diseño del sistema de control consistirá en la automatización del proceso de adicción del agente sorbente. Parámetros que actualmente se controlan dentro del proceso, como la temperatura de la caldera, las emisiones de Dióxido de azufre SO_2 y la velocidad de la válvula rotativa que alimenta la caliza al proceso, adicionando un medidor de flujo al proceso actual para obtener medición del sulfato de calcio agregado a la caldera, es necesario la instalación de un controlador lógico programable para ejecutar las acciones de control. La instalación y puesta en marcha de este sistema de control está estipulado para su implementación dentro de la planta en un plazo máximo de 6 meses previa aprobación por la empresa.

Cabe mencionar que dentro del desarrollo de este proyecto de grado no se encuentra contemplada la fase de implementación física del diseño, sino las simulaciones y bajo resultados obtenidos establecer las bases para su ejecución.

2. MARCO REFERENCIAL

2.1. ANTECEDENTES

Al emprender una minuciosa búsqueda de información que nos brindara algún tipo de aporte al desarrollo de este proyecto, se han encontrado varias aplicaciones de Controlador Proporcional, Integral y Derivativo, para uso de la industria propuestos como alternativas de mejora en varias tesis de pregrado y/o posgrado, esto indica que esta técnica se está convirtiendo en una herramienta que puede ser aplicada a procesos de carácter general. En los siguientes artículos podemos encontrar distintas aplicativos para los sistemas PID: Control PID Multivariable de una Caldera de Vapor; publicado por la Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial (Mercader, Cánovas Sánchez, & Baños, 2018), donde se presenta el diseño de un sistema de control con un controlador tipo proporcional integrador derivativo (PID) multivariable, mediante técnicas de optimización convexa, de este artículo se resalta, la metodología y técnicas aplicadas en el diseño del controlador PID, los autores describen las pautas que se deben tener en cuenta al momento de desarrollar un controlador por método de optimización convexas, aunque este método es de un nivel más avanzado al expuesto en este proyecto, se rescata las respuestas dinámicas obtenidas en las simulaciones realizadas.

Diseño, Implementación y Validación de un Controlador PID auto sintonizado; publicado por (Revista Tecnológica No. 28, ISSN 0123-7799, enero-junio de 2012, pp. 33-53), En este artículo se presenta el diseño de un controlador PID auto sintonizado que utiliza el método de mínimos cuadrados con reinicio de covarianza y el diseño por reubicación de polos para el cálculo de los parámetros del controlador.

Así mismo se encontraron en distintos repositorios, tesis de grado que abordan temas similares como; diseño y construcción de un sistema de control automático para una caldera piro tubular horizontal (López García, 2013), publicadas en el repositorio institucional de la escuela superior politécnica de Chimborazo, en el que se busca una mayor eficiencia y seguridad de la caldera. Este documento contribuye en la comprensión del comportamiento dinámico de las variables involucradas dentro del proceso de combustión de una caldera, y las acciones de control aplicadas sobre dichas variables, para lograr un control óptimo de la planta.

Diseño de una planta para la captura de SO_2 y CO_2 de gases industriales y reutilización de residuos de minería (Macías Leal, 2016), publicado en el repositorio de objetos de docencia e investigación de la universidad de Cádiz, en el que su objetivo es diseñar una planta que complemente a las industrias que emiten excedentes de gases de efecto invernadero, consiguiendo así cumplir los límites estipulados por la ley. Este trabajo de grado sirve como soporte para comprender las reacciones químicas dadas durante el proceso de combustión y desulfuración, usando como agente sorbente la piedra caliza pulverizada, presentando una similitud con el sistema de desulfuración presente en la central termoeléctrica objeto de estudio.

2.2. MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL

Sistemas de combustión avanzados

Combustión en lecho fluidizado con aditivos. La combustión del carbón en lecho fluidizado, con utilización de aditivos fijadores de azufre (caliza, dolomita) es una tecnología desarrollada industrialmente. Presenta la ventaja de reducir simultáneamente las emisiones de dióxido de azufre y de óxidos de nitrógeno. Está ganando plena aceptación comercial hasta el punto de que, en un futuro próximo, puede constituir la alternativa más práctica para la utilización energética de

carbones de baja calidad. Básicamente el proceso consiste en la combustión del carbón en un lecho conformado con caliza, que se mantiene fluidizado mediante el aire de combustión. La caliza reacciona con el dióxido de azufre formado en la combustión sulfato cálcico que se elimina juntamente con las cenizas del carbón. La capacidad de eliminación de azufre puede alcanzar cifras superiores al 90 por 100.

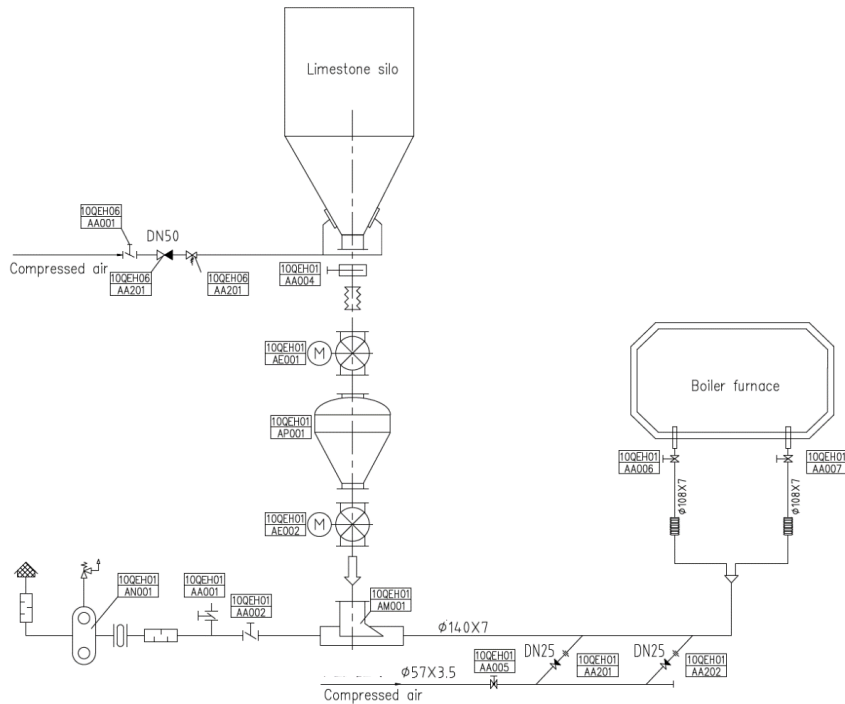
Por otra parte, dada la baja temperatura de combustión (típicamente en el intervalo de 850 a 900°C) prácticamente se elimina la formación de óxidos de nitrógeno «térmicos»). Con ello, los niveles de emisión de NO_x resultan claramente inferiores a los de las calderas de carbón pulverizado.

Comercialmente existen en la actualidad dos variantes de calderas de lecho fluidizado: lecho estacionario (también conocido como burbujeante) y lecho circulante (Temboury Villarejo, 1991).

Una tercera generación, actualmente en fase de planta piloto, pero con inmediata construcción de varias unidades industriales de demostración (entre ellas, la central térmica de Escatrón que quemará carbones subbituminosos), son las calderas de lecho fluidizado presurizadas.

Las calderas de lecho estacionario se caracterizan por una velocidad relativamente baja de los gases que atraviesan el lecho de material inerte (1,3 m/s). La extracción de calor se realiza mediante tubos de caldera y del sobre calentador inmerso en el lecho. (Temboury Villarejo, 1991)

Figura 1. Esquema de la adición de la caliza en la planta térmica.



Fuente: Plano constructivos del sistema GLBY-SHSXT-XT-00

En la figura 1 vemos la disposición física de los elementos usados para el proceso donde se controla manualmente la adición de caliza al proceso con la manipulación de una válvula rotativa, el operador de la planta debe estar pendiente de las emisiones de Dióxido de azufre SO_2 y dependiendo de estas le adiciona la caliza.

Automatización Industrial

La Automatización Industrial es la aplicación de diferentes tecnologías para controlar y monitorear un proceso, maquina, aparato o dispositivo que por lo regular cumple funciones o tareas repetitivas, haciendo que opere automáticamente, reduciendo al mínimo la intervención humana.

Lo que se busca con la Automatización industrial es generar la mayor cantidad de producto, en el menor tiempo posible, con el fin de reducir los costos y garantizar

una uniformidad en la calidad. (Crespo, 2011) La automatización industrial es de vital importancia en este proyecto ya que se debe implementar un sistema que sea capaz de aplicar la caliza sin la intervención del ser humano; dicha intervención solo será necesaria en la operación del sistema, pero no en el punto de origen de los gases tóxicos.

Instrumentación Industrial

Son dispositivos de naturaleza electrónica, electromecánica, mecánica, etc. que detectan las variables de procesos y las convierten en señales que puedan ser interpretadas por los controladores. También se incluyen los elementos de actuación que reciben señales de los controladores y accionan sobre los procesos (Turmero, s.f.)

La instrumentación industrial es una de las partes vitales para este proyecto ya que son los instrumentos que realizan las diferentes mediciones de las variables, para emitir la señal a los actuadores que liberan la caliza para empezar con el proceso de desulfuración.

Sistema de Control

Un sistema de control es un conjunto de dispositivos encargados de administrar, ordenar, dirigir o regular el comportamiento de otro sistema, con el fin de reducir las probabilidades de fallo y obtener los resultados teóricamente verdaderos. Por lo general, se usan sistemas de control industrial en procesos de producción industriales para controlar equipos o máquinas. (García, 2003)

Sistemas de control en lazo cerrado

Los sistemas de control realimentados se denominan también sistemas de control en lazo cerrado. En la práctica, los términos control realimentado y control en lazo

cerrado se usan indistintamente. En un sistema de control en lazo cerrado, se alimenta al controlador la señal de error de actuación, que es la diferencia entre la señal de entrada y la señal de realimentación (que puede ser la propia señal de salida o una función de la señal de salida y sus derivadas y/o integrales), con el fin de reducir el error y llevar la salida del sistema a un valor deseado. El término control en lazo cerrado siempre implica el uso de una acción de control realimentado para reducir el error del sistema. (Ogata, 2010)

Diagramas de bloques

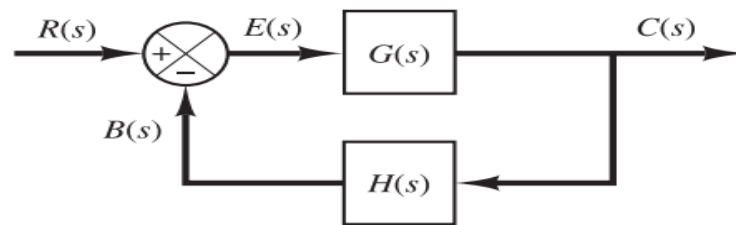
Un diagrama de bloques de un sistema es una representación gráfica de las funciones que lleva a cabo cada componente y el flujo de señales. Tales diagramas muestran las relaciones existentes entre los diversos componentes. A diferencia de una representación matemática puramente abstracta, un diagrama de bloques tiene la ventaja de indicar de forma más realista el flujo de las señales del sistema real. (Ogata, 2010)

Diagrama de bloques de un sistema en lazo cerrado.

La Figura 2 muestra un ejemplo de un diagrama de bloques de un sistema en lazo cerrado. La salida $C(s)$ se realimenta al punto de suma, donde se compara con la entrada de referencia $R(s)$. La naturaleza en lazo cerrado del sistema se indica con claridad en la figura. La salida del bloque, $C(s)$ en este caso, se obtiene multiplicando la función de transferencia $G(s)$ por la entrada al bloque, $E(s)$. Cualquier sistema de control lineal puede representarse mediante un diagrama de bloques formado por puntos de suma, bloques y puntos de ramificación. Cuando la salida se realimenta al punto de suma para compararse con la entrada, es necesario convertir la forma de la señal de salida en la de la señal de entrada. Por ejemplo, en un sistema de control de temperatura, por lo general la señal de salida es la temperatura controlada. La señal de salida, que tiene la dimensión de la

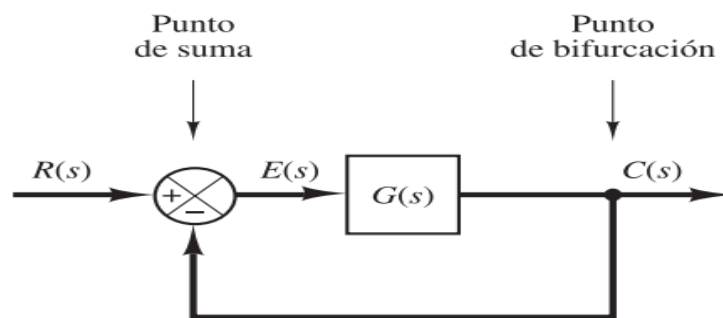
temperatura, debe convertirse a una fuerza, posición o voltaje antes de que pueda compararse con la señal de entrada. Esta conversión se consigue mediante el elemento de realimentación, cuya función de transferencia es $H(s)$, como se aprecia en la Figura 3. La función del elemento de realimentación es modificar la salida antes de compararse con la entrada. (En la mayor parte de los casos, el elemento de realimentación es un sensor que mide la salida de la planta. La salida del sensor se compara con la entrada y se genera la señal de error.) En este ejemplo, la señal de realimentación que retorna al punto de suma para compararse con la entrada es $B(s) = H(s) C(s)$

Figura 2. Diagrama de bloques de un sistema en lazo cerrado



Fuente: Ingeniería de control moderna (Ogata, 2010)

Figura 3. Sistema en lazo cerrado



Fuente: Ingeniería de control moderna (Ogata, 2010)

Las características de los controladores P, I y D

Un controlador proporcional (K_p) tendrá el efecto de reducir el tiempo de subida y reducirá, pero nunca eliminará el error de estado estable. Un control integral (K_i) tendrá el efecto de eliminar el error de estado estable, pero puede empeorar la respuesta transitoria. Un control derivado (K_d) tendrá el efecto de aumentar la estabilidad del sistema, reducir el sobre impulso y mejorar la respuesta transitoria. (National Instruments, 2012)

Los efectos de cada uno de los controladores K_p , K_d y K_i en un sistema de circuito cerrado se resumen en la tabla que se muestra a continuación.

Tabla 1. Efecto de los controladores PID en el sistema de circuito cerrado

RESPUESTA CL	HORA DE LEVANTARSE	EXCEDERSE	TIEMPO DE ESTABILIZACIÓN	ERROR SS
K_p	Disminución	Incrementar	Pequeño cambio	Disminución
K_i	Disminución	Incrementar	Incrementar	Eliminar
K_d	Pequeño cambio	Disminución	Disminución	Pequeño cambio

Fuente: (National Instruments, 2012)

Consejos generales para diseñar un controlador PID

Cuando se esté diseñando un controlador PID para un sistema determinado, es importante que se sigan los siguientes pasos para obtener la respuesta deseada:

- Obtener una respuesta de bucle abierto y determinar qué debe mejorarse.
- Añadir un control proporcional para mejorar el tiempo de subida.
- Añadir un control derivado para mejorar el sobre impulso.
- Agregar un control integral para eliminar el error de estado estable.

- Ajustar cada uno de K_p , K_i y K_d hasta que obtenga la respuesta general deseada. Siempre se puede consultar la tabla que se muestra en esta página "Tutorial PID" para averiguar qué controlador controla qué características. (National Instruments, 2012)

Control Station

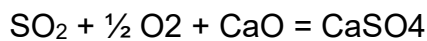
El software Control Station está equipado con una serie de herramientas de simulación. Cada módulo tiene un propósito único y ayuda a los instructores a poner los conceptos clave en un contexto claro. Equipados con Control Station, los instructores pueden ir más allá del desarrollo curricular y enfocarse en preparar a los estudiantes para el éxito en la industria. Los módulos de software de Control Station incluyen estudios de caso para cultivar una verdadera comprensión de la dinámica de procesos, puede ser útil utilizar herramientas de simulación. En particular, las simulaciones de procesos del mundo real permitiendo a los estudiantes desarrollar la intuición de cómo debe comportarse un proceso dado a través de pruebas repetidas, incluso de prueba y error. Estas herramientas también permiten a los estudiantes mejorar su comprensión de las diferentes formas del controlador PID mediante el examen de las diversas características de respuesta, el impacto del ruido y la influencia de las perturbaciones incontroladas. A pesar de la prevalencia del PID en aplicaciones industriales, la capacitación formal sobre dinámica de procesos y control basado en PID sigue siendo una rareza. Con tan poca comprensión formal, no es de extrañar que la sintonización de los controladores PID sea conocida como un "arte negro". Control Station está equipado con el módulo de herramientas de diseño, un modelado de procesos y una utilidad de ajuste del controlador PID. El software incluye un módulo de simulación avanzado llamado Proceso personalizado. Esta utilidad complementa el plan de estudios del curso y proporciona un entorno de "qué pasaría si" con el que los estudiantes pueden investigar las ventajas y desventajas de las estrategias de control alternativas. (Station, s.f.)

Métodos químicos de desulfuración

La desulfuración no es más que la solubilización del azufre en las emisiones de la combustión producida por combustibles fósiles.

➤ Desulfuración durante la combustión

Están basada en la inyección de compuestos químicos absorbentes en el interior de las calderas de combustión, basándose en la retención del SO₂ como sulfato cálcico, por adición de caliza.



Existen dos formas diferentes de realizar la retención de del Azufre: Por inyección de caliza en quemadores y por combustión en lecho fluidizado.

La primera posibilidad presenta problemas en el funcionamiento de los hornos y generalmente baja eficiencia.

La combustión en lecho fluidizado permite reducir hasta el 90% del contenido de SO₂ de los gases de combustión mediante la adición de adsorbentes al lecho. (Rodríguez & Velasco Hurtado, 2005)

La reacción química que se produce entre la caliza y el SO₂ a una temperatura específica en el proceso de combustión disminuye las emisiones de SO₂ al ambiente, llevándolas a rangos permitidos, esta reacción química es denominada desulfuración, y se debe garantizar que esta se de en el lecho de la caldera. (Rodríguez & Velasco Hurtado, 2005)

➤ Tecnología de Lecho Fluidificado o Fluidizado

El proceso consiste en una mezcla de partículas sólidas suspendidas en un flujo gaseoso ascendente, que en conjunto presenta propiedades fluidas. La combustión

tiene lugar en el lecho con altas transferencias caloríficas al hogar de la unidad a bajas temperaturas de combustión

Las ventajas del proceso radican en la flexibilidad del combustible a utilizar las reducidas emisiones que se producen Para visualizar el proceso de fluidificación, en la Fig. 4a se presenta un recipiente que tiene, en su parte inferior, una cámara de suministro de aire coronada por una placa distribuidora que asegura el flujo de aire a través del lecho. La cámara superior, por encima del nivel del lecho, está llena de arena o de un material granular de forma que se hace circular un pequeño flujo de aire a través de la placa distribuidora hacia la arena estática que tiene encima, pasando por los huecos de esta. A bajas velocidades del flujo de aire, la fuerza que se ejerce sobre las partículas de arena no es grande, por lo que éstas permanecen estáticas, lo que caracteriza el lecho fijo o colapsado, representado en la Fig.4b

Al aumentar el flujo de aire, el fluido ejerce una fuerza mayor sobre las partículas de arena reduciendo la fuerza de contacto entre las mismas, llegándose a un equilibrio entre las fuerzas de arrastre y gravedad, momento en el que las partículas quedan en suspensión dentro del flujo ascendente de aire

El instante en el que el lecho comienza a comportarse como un fluido caracteriza la condición mínima de fluidificación que, una vez superada, Fig.4c, presenta un incremento del volumen del lecho, respecto al del lecho no fluidificado

Si el flujo de aire sigue aumentando, el lecho se hace menos uniforme y se forman burbujas de aire, por lo que el lecho comienza a ser algo turbulento (etapa de lecho burbujeante), Fig.4d.

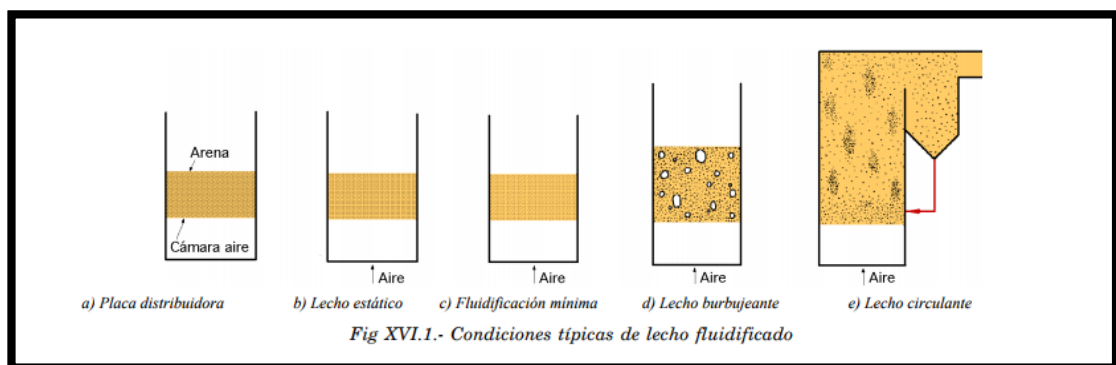
En esta situación, el volumen ocupado por la mezcla (sólidos + aire) se incrementa de forma importante, observándose un nivel de lecho perceptible y una transición entre el lecho y su espacio superior perfectamente diáfana

Al incrementar aún más el flujo de aire, las burbujas se hacen más grandes y se empiezan a combinar entre sí, configurando grandes huecos en el seno del lecho,

al tiempo que los sólidos presentes están en contacto como grupos altamente concentrados, (lecho fluidificado turbulento)

Si a la salida del recinto los sólidos se capturan y devuelven al lecho, se dice que circulan a lo largo de un bucle; esta etapa se identifica como lecho fluidificado circulante, Fig.4e

Figura 4. Calderas de lecho fluidificado



Fuente: (Fernandez Diez, 2017)

La tecnología por el método de desulfuración en calderas de lecho fluidizado es una técnica confiable en un 90% en el proceso de captura del azufre mediante el uso de la caliza. El sistema óptimo es a través del método fluidificado circulante.

Emisiones Atmosféricas Contaminantes

Para mejorar y preservar la calidad del aire y evitar y reducir el deterioro del medio ambiente, los recursos naturales renovables y mejorar la calidad de vida de la población, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (en Colombia) ha adoptado estrategias enfocadas a seguimiento y control de las emisiones contaminantes generadas por fuentes fijas (aquella fuente de emisión situada en un lugar determinado e inamovible, aun cuando la descarga de contaminantes se

produzca en forma dispersa) y fuentes móviles (fuente de emisión que por razón de su uso o propósito, es susceptible de desplazarse, como los automotores o vehículos de transporte a motor de cualquier naturaleza). Para el control y prevención de las emisiones contaminantes generadas por fuentes fijas y móviles este Ministerio ha adoptado estándares de emisión admisibles de contaminantes al aire y establecido procedimientos y especificaciones técnicas requeridas para su monitoreo. (Minambiente, 2017)

Estas emisiones son reguladas mediante la creación de normas nacionales e internacionales de estricto cumplimiento para las empresas generadoras, para poder operar de forma confiable en el mercado de la generación de energía.

2.3. MARCO LEGAL

En la actualidad las emisiones de partículas contaminantes a la atmósfera es el mayor problema en todo tipo de Centrales de producción de energía. Para la reducción de estas emisiones y el cumplimiento de las normativas en materia de medio ambiente es totalmente necesaria la implantación de este tipo de procesos de desulfuración, con el objetivo de evitar el pago de un canon excesivo o multas e incluso evitar la parada de la Central por las autoridades ambientales.

Dando cumplimiento de la normativa medioambiental referida al nivel de azufre en los gases de emisión a la atmósfera, hablaremos específicamente de la norma que regula las emisiones al ambiente en Colombia para las centrales de generación de energía térmica.

Norma colombiana

Resolución N° 909 de 2008 “Por la cual se establecen las normas y estándares de emisión admisibles de contaminantes a la atmósfera por fuentes fijas y se dictan otras disposiciones”.

Artículo 9. Estándares de emisión admisibles de contaminantes al aire para centrales térmicas existentes con capacidad instalada igual o superior a 20 MW. En la Tabla 6 se establecen los estándares de emisión admisibles para cada uno de los puntos de descarga de las centrales térmicas existentes con capacidad igual o superior a 20 MW por tipo de combustible y condiciones de referencia. Los datos medidos serán corregidos al oxígeno de referencia correspondiente.

Tabla 2. Estándares de emisión admisibles de contaminantes al aire para centrales térmicas existentes con capacidad instalada igual o superior a 20 MW por tipo de combustible, a condiciones de referencia (25° C, 760 mm Hg).

Combustible	Estándares de emisión admisibles			Oxígeno de referencia
	MP	SO ₂	NO _x	
Sólido	100	2800	760	6%
Líquido	100	2000	650	3%
Gaseoso	NO APLICA	NO APLICA	300	3%

Fuente: (Ministerio de Ambiente, 2008)

Reglamento del Control y calidad del aire en Colombia.

Capítulo II.

Disposiciones generales sobre normas de calidad del aire, niveles de contaminación, emisiones contaminantes y de ruido

Artículo 3°. Tipos de contaminantes del aire.

Son contaminantes de primer grado aquéllos que afectan la calidad del aire o el nivel de inmisión, tales como el ozono troposférico o "smog" fotoquímico y sus precursores, el monóxido de carbono, el material particulado, el dióxido de nitrógeno, el dióxido de azufre y el plomo. (Ministerio de Ambiente, 2008)

3. DISEÑO METODOLÓGICO

3.1. MÉTODO DE ESTUDIO

Para el desarrollo de este diseño se utilizará la metodología evaluativa, con la que se determinaran analíticamente los indicadores de eficiencia, eficacia, efectividad, y productividad del proceso de desulfuración de una central termoeléctrica, en el que se utilizaran variables cualitativas y cuantitativas; a través del monitoreo y evaluación de resultado de las simulaciones.

3.2. POBLACIÓN Y MUESTRA

Las actividades concernientes al diseño de un sistema automatizado para proceso de adición de caliza se determinarán en base a los datos obtenidos de una serie de muestras aleatorias en los resultados del simulador, que nos permitirán establecer con precisión el modelo matemático adecuado para cumplir con los objetivos.

3.3. FUENTES DE INFORMACIÓN

Para efectos de este diseño se utilizan dos tipos de fuentes de información, dispuestas según su nivel de importancia, como primarias y secundarias.

Se entenderá que la fuente primaria, serán los resultados de las simulaciones que determinarán la consecución de resultados.

Se entenderán por fuentes secundarias, a los documentos, textos artículos y tesis que han servido como soporte para esta investigación. El departamento de Ingeniería Química de la Universidad de Camagüey realiza el equipamiento de un horno rotatorio a escala piloto para disminuir las emisiones de dióxido de azufre emitidas por la central termoeléctrica "10 de octubre". Realizan la aplicación de cal viva según la variación de diversos parámetros para disminuir la emisión de gases tóxicos. Como resultado de esta prueba piloto se obtiene que se puede lograr una introducción de una tecnología de desulfuración de gases de combustión a partir de la utilización de la cal viva (Benítez Cortés, Prieto Montenegro, Ramos Sánchez, & García, 2006)

Esta propuesta puede ser implementada en el proyecto que se está desarrollando ya que emplea la cal como neutralizante, pero es necesario estudiar la viabilidad económica para la empresa de realizar un horno como el que empleo el departamento de ingeniería de la universidad de Camagüey.

En la publicación realizada por la red de revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal, se da determinado un alto grado de contaminación del aire por la quema de hidrocarburos los cuales son necesarios para la producción de energía eléctrica. Para lograr mitigar este impacto al ambiente se implementa un sistema de horno donde se aplique hidróxido de magnesio para lograr neutralizar el trióxido de azufre. Como resultado se obtiene que al aplicar el aditivo a base de hidróxido de magnesio el 75% de las partículas tenían un tamaño menor a 5 μm y que el aditivo tuvo un 93% de partículas menores a 10 μm . Esto es un factor a favor

de la efectividad del aditivo, ya que entre menor sea el tamaño de la partícula reaccionará más fácilmente con las moléculas de vapor de ácido sulfúrico. (Sandra Leticia García-Arreola, 2009)

Aunque en el artículo se describe la eficiencia de aplicar el compuesto de hidróxido de magnesio para neutralizar las emisiones de los gases, es necesario hacer una prueba para determinar si en el proyecto que se está ejecutando se puede aplicar este mismo compuesto, ya que son emisiones diferentes y en cantidades variables.

(Díaz González, 2016), estudiante de ingeniería civil mecánica de la universidad de Chile, indica que la caliza que se debe utilizar es más que la caliza teórica dado que la reacción de retención del azufre no es 100% efectiva La norma ASME PTC 4.0 define la relación calcio azufre con la reacción (2.25).

3.4. TÉCNICAS Y RECOLECCIÓN DE LA INFORMACIÓN

Para el desarrollo del proyecto se realiza una investigación exhaustiva en diferentes fuentes bibliográficas ligadas a conceptos necesarios con los que se pueda obtener la relación adecuada entre caliza, temperatura y emisiones de SO_2 para poder empezar con el diseño del sistema de control.

Fase de automatización.

Esta fase se realizará mediante la implementación de los recursos disponibles para la elaboración del control del automatismo y su puesta en servicio, teniendo en cuenta el sistema al cual se integrará este automatismo, realizando los siguientes pasos:

Observación minuciosa del proceso a controlar para acertar en el debido control que se va a implementar.

Seleccionar el tipo de automatismo a usar, en este caso será un controlador lógico programable (PLC).

Selección de las variables necesarias para desarrollar el sistema de control.

Para establecer la ubicación física de los instrumentos y equipo de control a utilizar se deben estudiar los planos mecánicos, eléctricos y de control existentes sobre el sistema de adición de caliza que actualmente opera en la central térmica, para no entorpecer la operación de los equipos que se encuentran instalados y funcionando.

4. RESULTADOS

4.1. IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES

Para poder desarrollar este sistema de control, es de vital importancia saber cuáles son las variables por controlar, en este caso, las emisiones de Dióxido de azufre SO_2 , el flujo de sulfato de calcio suministrado al proceso, la temperatura del lecho de la caldera y la velocidad de la válvula rotativa, así mismo es importante conocer los instrumentos que se relacionan con las variables principales inmersas en el proceso.

Para darle viabilidad a este proyecto se tuvo en cuenta el aprovechamiento de los sensores y dispositivos ya instalados en la planta, con la finalidad de disminuir costos en la implementación de este, solamente se propondrá la adquisición de nuevos equipos que se requieran para la ejecución del sistema de control.

Dentro del proceso de combustión para una caldera de lecho fluidizado, encontramos una serie de variables, a continuación, detallamos cada una de ellas y los instrumentos que tienen relación con estas:

- Presión del lecho: Se utiliza como indicación para la extracción de cenizas presentes en la caldera. El equipo usado para medir esta variable es el transmisor de presión diferencial Rosemount 3051. Este dispositivo detecta la diferencia de presión entre dos puntos de medida y emite una señal de 4-20 mA que representa esa presión en relación con un rango calibrado.
- Presión de vapor: Con esta variable se controla el envío de vapor a la turbina. Para medir la presión del vapor principal se utilizan sensores Yokogawa modelo EJA310A que están dotados de un elemento sensible a la presión y que emiten una señal eléctrica dentro del rango de 4-20 mA al variar la presión y provocan operaciones de conmutación si esta supera un determinado valor límite.
- Temperatura del hogar: Es usada como referencia para obtener el rango óptimo de combustión. El valor de temperatura es tomado mediante una termocupla tipo K la cual envía ese valor a una tarjeta electrónica de entrada analógica ubicada en el sistema de control distribuido (*Distributed Control Center* (DCS) por sus siglas en inglés).
- Emisiones de gases: Cantidad de gases emitidos al ambiente, entre ellos NO_x, SO₂, CO₂ entre otros. El sistema de monitoreo continuo de emisiones SMC-9021 para gases de combustión (CEMS), utiliza el método de muestreo Extractivo para extraer el gas de combustión de la chimenea a través de la sonda de muestreo, la línea de muestreo, la unidad de pretratamiento y finalmente transportado al Analizador de Gas Infrarrojo. La concentración de los componentes de gas medidos se medirá y se mostrará en el panel frontal del analizador (SICK, 2015).
- Flujo de aire: Es utilizada para el proceso de fluidización en el proceso de combustión. Mediante el sensor de flujo por efecto Venturi del fabricante MC (Modelo WQL-60), se controla el flujo de aire utilizado en el proceso de combustión dentro de la caldera.

- Flujo de carbón: Indica la cantidad de carbón alimentado a la caldera. El controlador de flujo SAIMO 6105 está especialmente diseñado para pesar el material que pasa continuamente por la banda transportadora, el pesaje lo realiza a través de 8 celdas de carga de 350 Ω , la velocidad de la banda la adquiere mediante un sensor de velocidad ubicada en el eje del motor principal.
- Velocidad de válvula rotativa: Controla la cantidad de caliza que se adiciona a la caldera. Los Encoder son ampliamente usados en la industria para traducir el movimiento rotativo o lineal en una señal digital. Para nuestro caso usamos el Encoder PLR 2300 del fabricante SAIMO para la medición de la velocidad de la válvula rotativa.

Variables de intervención

Para el desarrollo del sistema de control se tomó de referencia las siguientes variables ya que son las que intervienen directamente en el proceso de automatización:

- Temperatura del hogar: Esta variable se utilizará para garantizar que la adición de caliza solo se realice cuando la temperatura del hogar se encuentre entre los 850°C y 900°C en los cuales ocurre el proceso de desulfuración.
- Emisiones de gases: Para el diseño del controlador utilizaremos la señal del SO₂ como variable de retroalimentación para ajustar la velocidad de rotación de la válvula rotativa.
- Velocidad de válvula rotativa: En base a la señal retroalimentada se ajusta de manera automática la velocidad de la válvula rotativa para entregar la cantidad necesaria para el control de emisiones.

4.2. MODELO MATEMÁTICO DEL SISTEMA

Para obtener el modelo matemático de una planta, es viable aplicar diversas técnicas de diseño con el fin de establecer los parámetros del controlador que cumpla las especificaciones del transitorio y del estado estacionario del sistema en lazo cerrado. Sin embargo, si la planta presenta un alto grado de complejidad por lo que no es fácil obtener su modelo matemático, y tampoco es posible un método analítico para el diseño de un controlador PID. En tal caso, se debe acudir a procedimientos experimentales para la sintonía de los controladores PID. (Ogata, 2010)

Para simplificación del modelo, de los cálculos, las pruebas y simulaciones a realizar, se tomará el modelo de primer orden y a partir de su función de transferencia se hará la sintonización de controladores, el modelo matemático de la planta se obtendrá mediante la función de transferencia $\frac{Y(S)}{U(S)} = \frac{K_p e^{-\theta S}}{\tau_p S + 1}$ a partir de los valores obtenidos en *Control Station* se tiene que:

$$k_p = -102,02 ; \tau_p = 3,96 ; \theta = 20,96$$

Estos valores son obtenidos mediante los que se conoce como método gráfico, se identifican a partir de la gráfica de respuesta en el tiempo de la planta en lazo abierto, a continuación, se describe cada uno de los valores que ayudarán a construir el modelo matemático de nuestro proceso.

K_p : Ganancia del sistema en estado estático, es la relación entre la magnitud de respuesta de salida y la ganancia del escalón aplicado como excitación.

τ_p : Constante de tiempo del sistema, tiempo en que la respuesta del sistema alcanza el 63% de la respuesta en estado estacionario.

Θ : Retardo del sistema, tiempo que se tarda el sistema en responder ante una excitación de entrada.

De esta manera la función de transferencia que describe al proceso queda de la siguiente manera:

$$\frac{Y(S)}{U(S)} = - \frac{102,07e^{-20,96S}}{3,95S + 1}$$

Las explicaciones correspondientes a la obtención de los cálculos para la calcular el modelo matemático se detallan en el apartado siguiente.

4.3. DISEÑO DEL CONTROLADOR

La sintonización de controladores consiste en un ajuste que se hace sobre los parámetros del proceso para obtener una salida regulada y ajustada a las exigencias propias del lazo de control y de las necesidades de producción o de producto, existen varios métodos de obtención de controladores, a saber:

➤ Método de oscilación continúa.

Es un método que se aplica únicamente en lazo cerrado, consiste en hallar la ganancia crítica K_c a la que el sistema empieza a oscilar, luego a partir de este valor experimental se hace el cálculo de las demás variables de sintonización T_i y T_d , más adelante en el tratamiento y cálculo de las variables se detallarán de mejor manera.

➤ Método Ziegler – Nichols.

Este método también se conoce como el método de la curva de reacción, consiste en aplicar una excitación tipo escalón a la entrada del sistema en lazo abierto y, a partir de la curva de reacción descrita por éste construir un modelo de función de transferencia del sistema, a partir de los valores obtenidos de la curva de reacción también se obtienen las variables propias del controlador sintonizado, “Este método de lazo cerrado fue desarrollado por Ziegler y Nichols, en 1940, y permite calcular los tres términos de ajuste

del controlador a partir de los datos obtenidos en una prueba rápida de características del lazo cerrado de control” (Creus Sole, 2010).

➤ Método de Cohen y Coon.

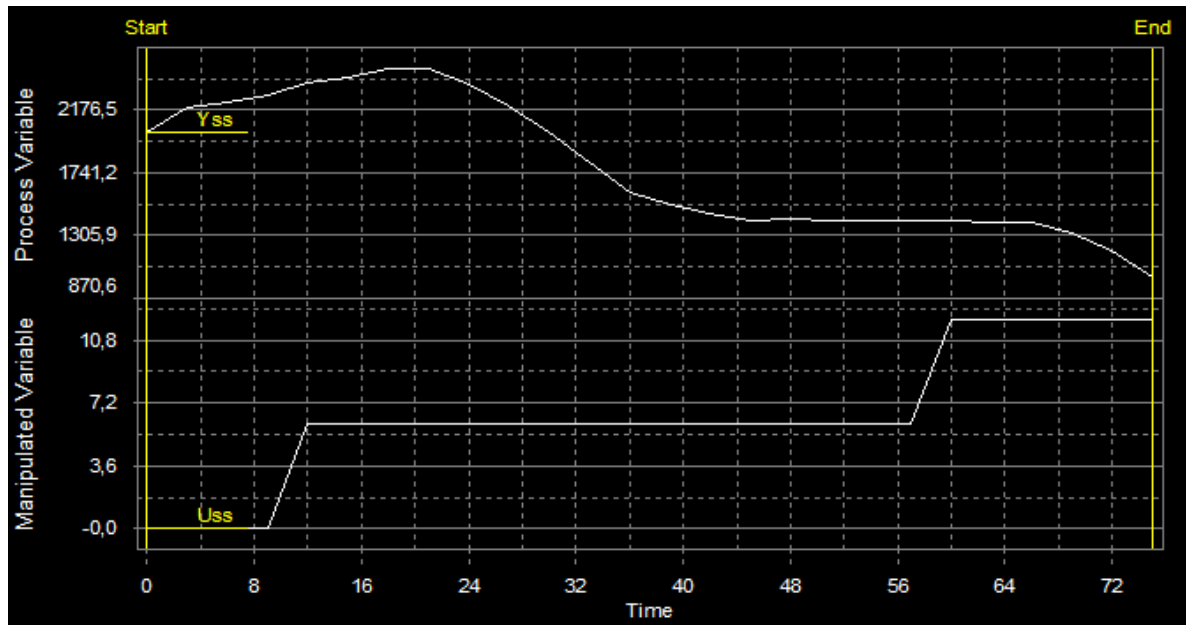
Consiste en una corrección hecha sobre los estudios realizados por Ziegler y Nichols, se detectó que en sistemas autorregulados se requiere un parámetro de ajuste llamado índice de autorregulación que hace que la sintonización opere en esta clase de sistemas.

Los métodos descritos son los más reconocidos para la sintonización de controladores PID, teniendo en cuenta la descripción hecha de los tres, se procede en primera instancia a utilizar el método de Ziegler – Nichols, ya que, el sistema sobre el que se pretende realizar la estrategia consiste en una planta actualmente en producción y, por este motivo resulta difícil aplicar el método de la curva de oscilación, ya que se afectaría la producción actual del proceso, por otro lado, el método Ziegler – Nichols puede arrojar un controlador eficiente para este lazo de control ofreciendo un resultado robusto y ajustable en caso de variar las condiciones del proceso, ya que los parámetros de ajuste de la acción de control actúan de manera fácilmente identificable y en caso de resultar un sistema con autorregulación, se procedería a realizar los ajustes con el método Cohen y Coon.

El método de ajuste de Ziegler Nichols permite obtener una estrategia de control ajustable y adaptativa con respuesta óptima ante sistemas como el desarrollado en este trabajo.

Para proceder con la sintonización del controlador, primero se debe hacer una aproximación al modelo que describe el comportamiento de la planta, para este fin se utilizó un método gráfico ya mencionado, la curva de reacción, inicialmente se aplicó un escalón en la variable de entrada para obtener la reacción de la planta en su salida, la figura 5 muestra la respuesta de la planta ante la variación de la entrada.

Figura 5. Respuesta al escalón



Fuente: Autores del proyecto

Sobre esta gráfica se deben identificar tres parámetros que definirán la función de transferencia del sistema, esta es la ecuación matemática que se utilizará para pasos como la simulación o construcción de gráficas de respuesta del sistema en paquetes de software como *Matlab* o *Control Station*. Los parámetros que se deben identificar son los siguientes:

- Δu : Magnitud del escalón aplicado.
- Δy : Cambio en la variable controlada o a controlar.
- K_p : Ganancia del sistema, se calcula $K_p = \frac{\Delta y}{\Delta u}$.
- t_1 : Tiempo que tarda el sistema en alcanzar el 63.2% de su respuesta máxima.
- t_2 : Tiempo de respuesta del sistema tomado a través de método gráfico, se explica adelante.
- T : Es la constante de tiempo del sistema, se obtiene restando los valores t_2 y t_1 .

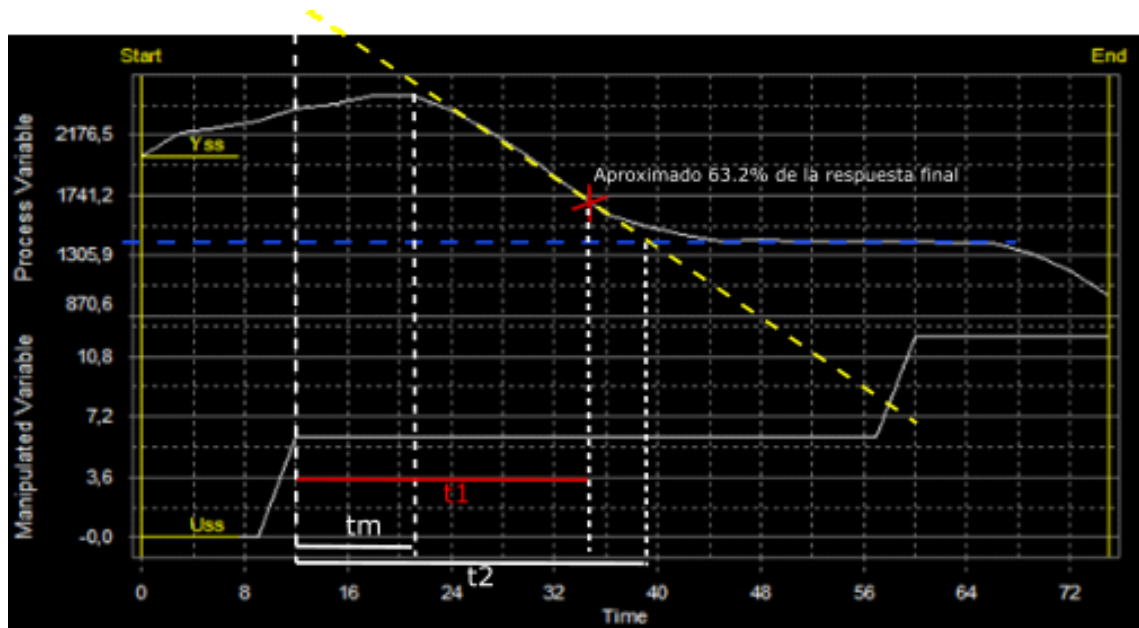
- t_m : A simple vista, la respuesta de la planta ante el escalón aplicado permite apreciar que, el sistema tiene un tiempo muerto, esto se aprecia en el eje temporal de la gráfica en el que se denota un retardo de la planta para reaccionar ante la excitación aplicada.

Estas variables se obtienen sobre la gráfica de la respuesta del sistema, se toma la zona de la gráfica en que se presenta la pendiente más estable y se traza con base en ella una recta tangente, se toma el punto de corte de la recta tangente con el eje de tiempo para iniciar la toma de los tiempos, t_1 como ya se mencionó consiste en el tiempo en que el sistema alcanza el 63.2% de su respuesta final estable, se toma el corte entre la tangente trazada y la proyección de la respuesta estable del sistema determinará t_2 , con estas variables luego procederemos a definir la función de transferencia del sistema, esta será una función primer orden con retardo:

$$G(S) = \frac{K_p e^{-t_m S}}{\tau S + 1}$$

Para hacer mayor claridad sobre este punto, se tratará de ilustrar a través de la Figura 6 las variables a través de la gráfica de respuesta obtenida del sistema.

Figura 6. Obtención de variables sobre respuesta del sistema

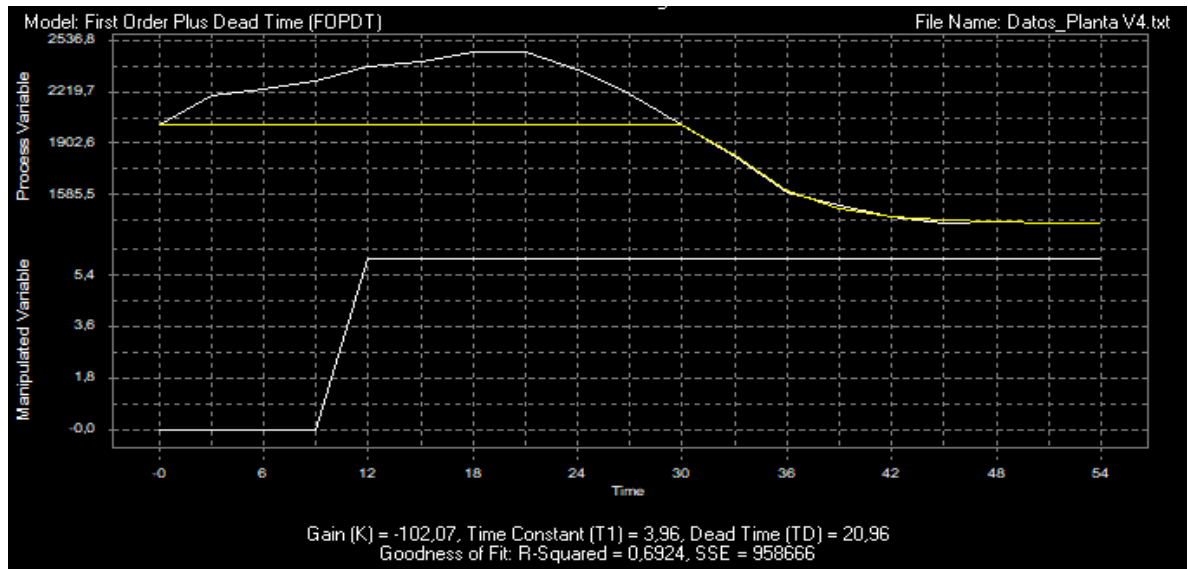


En la figura 6 se aprecian los puntos descritos para definir las variables propias de la función de transferencia del sistema, el cálculo de estos valores por este método puede no ser tan precisa como se desea, por lo que se recurrirá al paquete de software *Control Station*¹ que permitan hacer la construcción del modelo de una forma más precisa, luego mediante simulación se comprobará la fiabilidad del proceso en general, aprovechando las potencialidades de este software también se puede obtener un modelo de segundo orden del sistema, este modelo puede dar una mayor cercanía al proceso real. A continuación, se describe este ejercicio y se procede a los demás pasos comprendidos dentro de la obtención del controlador para el sistema.

Los datos obtenidos se procesaron mediante el *software free Control Station*¹ durante este proceso se hacen ajustes gráficos y teóricos para obtener el modelo que mejor se aproxime a la planta, se realizaron aproximaciones para modelos de primer y segundo orden, de esta manera se puede hacer la selección de la aproximación que mejor describa el comportamiento del proceso y así poder probar ante los mismos el controlador que funcione mejor ante las exigencias propias de la planta modelada; la figura 6 muestra el modelo de primer orden mientras que la figura 7 muestra el modelo aproximado de segundo orden.

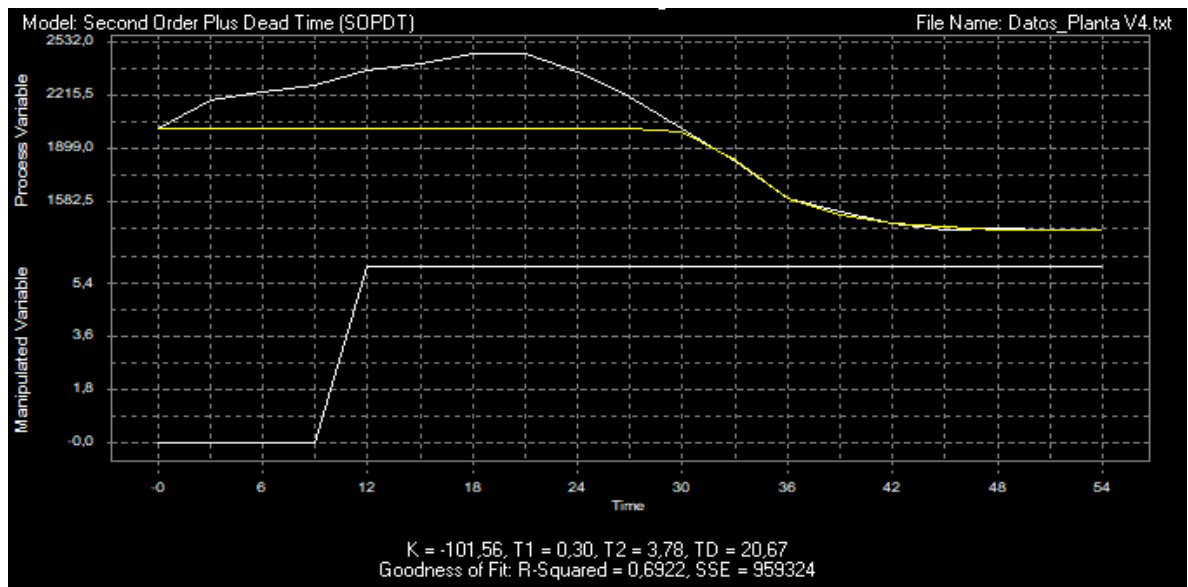
¹ Control Station® permite optimizar los controladores de forma rápida y confiable permitiendo además realizar análisis de prueba y métodos de diseño en el transcurso de la puesta a punto.

Figura 7. Modelo aproximado de primer orden



Fuente: Autores del proyecto

Figura 8. Modelo aproximado de segundo orden



Fuente: Autores del proyecto

Al revisar ambos modelos, se puede establecer que, se obtiene la misma aproximación, por tal, para simplificación del modelo, de los cálculos, las pruebas y simulaciones a realizar, se tomaran los cálculos obtenidos en el modelo matemático

de primer orden, de tal manera que tendremos una función de transferencia de primer orden con retardo.

$$k_p = -102,02 ; \tau_p = 3,96 ; \theta = 20,96$$

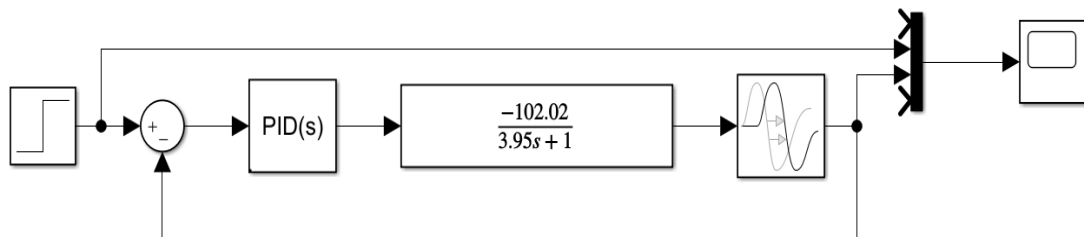
De esta manera la función de transferencia que describe al proceso queda de la siguiente manera:

$$\frac{Y(S)}{U(S)} = G(S) = -\frac{102,07e^{-20,96S}}{3,95S + 1}$$

4.4. SIMULACIONES

Con la información obtenida luego del proceso de identificación del sistema, se procedió a realizar la simulación en lazo abierto del proceso utilizando la herramienta *Simulink* de *MatLab*² para comprobar que la respuesta del sistema modelado responde a la dinámica observada en la planta real, la figura 10 muestra los resultados obtenidos con la aplicación de varios escalones de diferente valor.

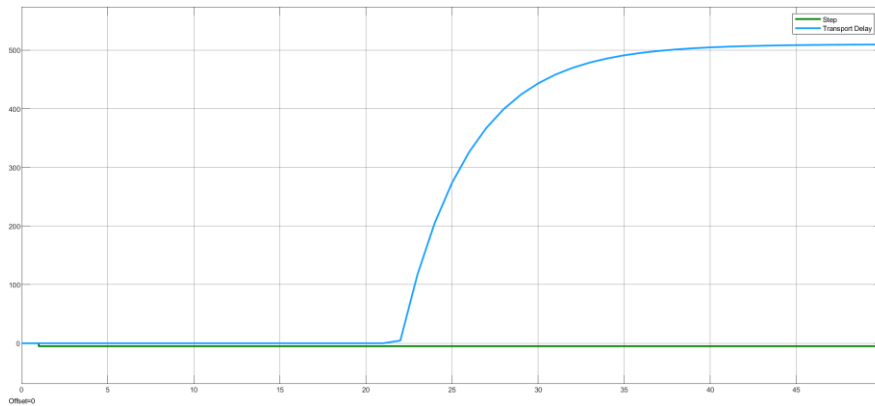
Figura 9. Diagrama de bloques del sistema



Fuente: Autores del proyecto

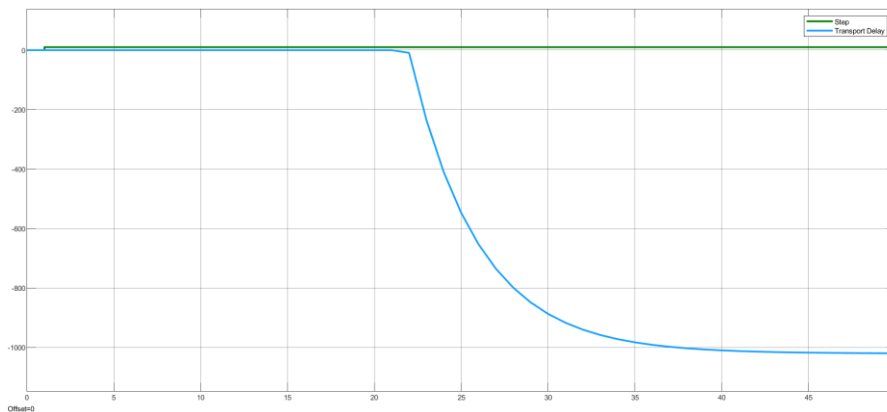
Figura 10. Simulación en *Simulink* con un escalón negativo con valor de 5

² Modele la dinámica de planta y diseñe y ajuste bucles de realimentación y controladores de supervisión. Utilice modelos de simulación para verificar el diseño de control y para generar automáticamente código para prototipado rápido y producción.



Fuente: Autores del proyecto

Figura 11. Simulación en *Simulink* con un Escalón positivo con valor de 10



Fuente: Autores del proyecto

Se realizaron simulaciones con distintos valores para el escalón aplicado como excitación de entrada obteniendo respuestas lógicamente asociadas con la respuesta esperada, por tal se procede a realizar la sintonización del controlador para el sistema. A partir del método de sintonización de Ziegler Nichols se procede a encontrar los valores propios del sistema de control, el controlador PID obtenido mediante este método consta de tres (3) variables, a saber:

- K_p : Es la ganancia proporcional del controlador, esta variable busca reducir el error en estado estacionario.

- **K_i** : Es la constante de acción integral del controlador, esta busca disminuir el error en estado estacionario derivado de perturbaciones externas que no pueden ser corregidas por la parte proporcional.
- **K_d** : La constante de acción derivativa ataca los cambios en el valor absoluto del error, es decir, corrige las oscilaciones del sistema por encima o por debajo del set point y actúa de manera constante.

Las variables correspondientes a la parte Integral Derivativa del controlador actúan en ocasiones como variables de tiempo, según el software o dispositivo utilizado se deben hacer cálculos de conversión sencillos entre las constantes o tiempos.

$$k_c = (1,2 \text{ a } 2) \frac{\tau}{k_p \theta}$$

$$T_i = 2\tau$$

$$T_d = 0,5\tau$$

Aplicando las reglas de sintonización se obtuvieron las variables para el controlador:

$$K_c = -0.0037$$

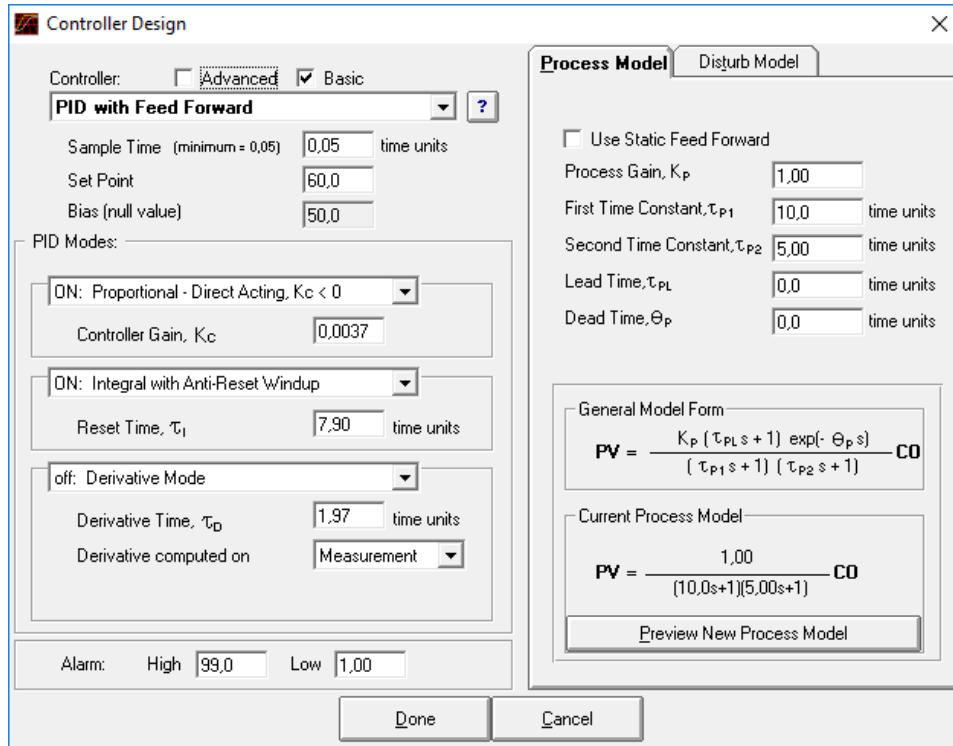
$$T_i = 7,90 \text{ s}$$

$$T_d = 1,97 \text{ s}$$

Con estas variables se procedió a realizar las respectivas simulaciones en la herramienta Control Station, teniendo en cuenta que el método utilizado para el diseño del controlador es una sintonización, luego de la implementación en simulador se procede a ajustar los valores de las variables para llegar a una respuesta optima visible a través de las pruebas realizadas, es válido en este punto recordar que los métodos utilizados tanto para la identificación del sistema, propuesta de controlador y simulación son métodos gráficos; como resultado de los ajustes se tiene.

Configuración de controlador y función de transferencia de la planta en el simulador.

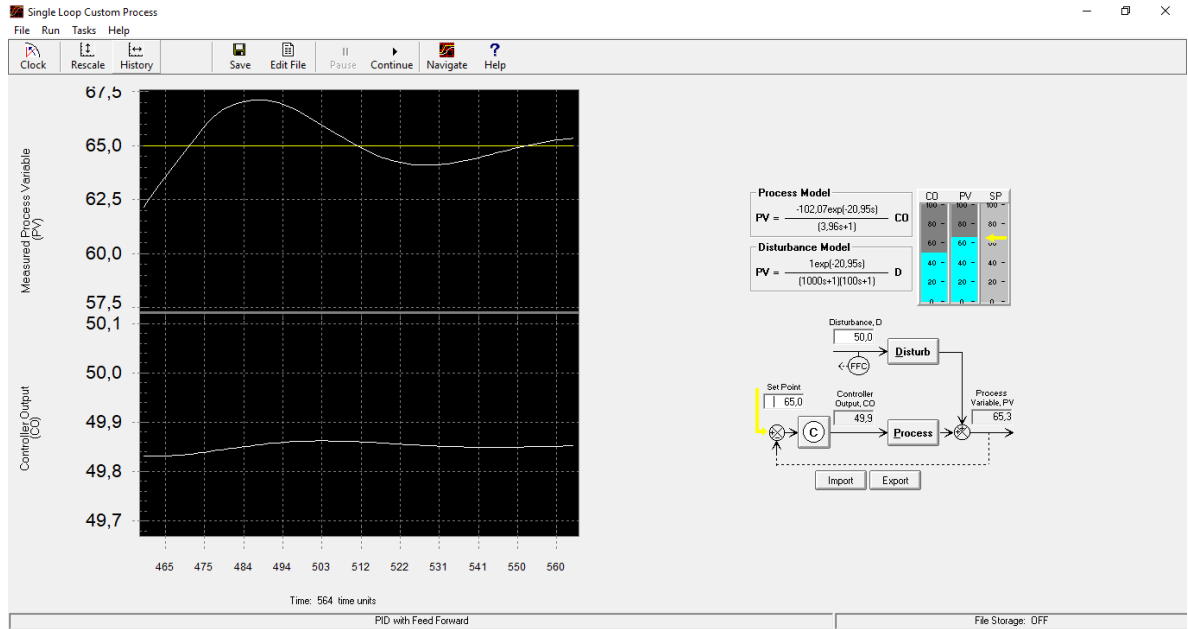
Figura 12. Configuración de variables de simulación en software *Control Station*



Fuente: Autores del proyecto

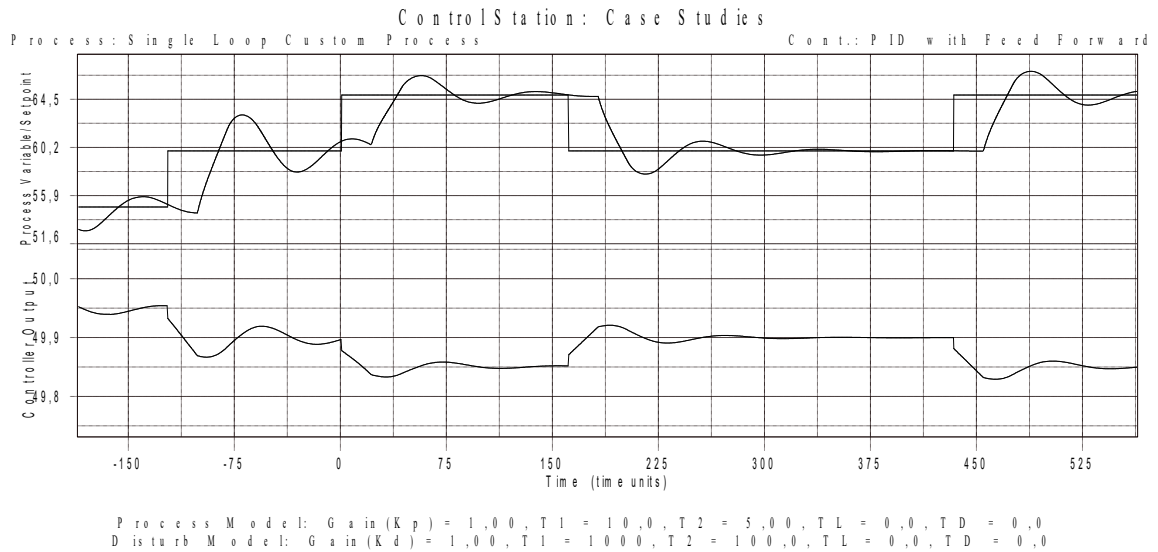
Finalmente, se tiene la gráfica simulación de proceso en lazo de control realimentado con una perturbación estándar, el controlador responde a la variación del *setpoint* en la variable de control, la figura 12 muestra la simulación realizada en el software seleccionado y la figura 13 muestra los resultados gráficos del proceso intervenido por controlador.

Figura 13. Visualización de simulación del proceso en *Control Station*



Fuente: Autores del proyecto

Figura 14. Respuesta de la planta con control PID implementado ante variaciones del *SetPoint*



Fuente: Autores del proyecto

En la simulación, por temas de las variables propias del software se trabajó la variable controlada en términos de porcentaje ya que, no es posible alterar los límites de trabajo de simulación en los niveles de la variable original, sin embargo la simulación arroja resultados muy satisfactorios, se puede observar claramente elementos propios de la planta modelada como el tiempo de retraso en la respuesta de la variable controlada, además se aprecia una respuesta sin sobre impulsos de consideración y con ajuste óptimo al *setpoint* establecido.

Según los estudios realizados se evidencia que no se tiene un control efectivo de la adición de caliza, las emisiones de SO₂ son muy fluctuantes en el tiempo obligando a que personal de operación tenga que estar de forma manual realizando la adición descontrolada de caliza para corregir los picos máximos de emisiones que oscilan alrededor de 2200mg/m³.

Durante un periodo de 90 minutos, se realiza un muestreo de las emisiones expulsadas al medio ambiente operando el sistema en modo manual, luego de finalizar el diseño del controlador automático se procede a realizar una serie de simulaciones sobre esta misma línea de tiempo.

Tabla 3. Tabulación de datos de las emisiones en modo manual y modo automático

Tiempo	SO₂ (mg/m³) Manual	SO₂ (mg/m³) Control
18:55	510,03	515,89
18:58	723,78	754,56
19:01	943,34	955,78
19:04	1278,39	1286,21
19:07	1434,56	1467,01
19:10	1695,89	1622,54
19:13	1857,65	1616,34
19:16	2018,92	1510,28
19:19	2151,32	1467,38
19:22	2231,54	1454,56
19:25	2280,36	1499,67
19:28	2369,09	1527,65
19:31	2402,05	1529,43
19:34	2458,37	1509,45
19:37	2462,16	1501,02
19:40	2352,86	1500,23
19:43	2205,01	1499,89
19:46	2021,26	1502,02
19:49	1816,54	1498,98
19:52	1602,71	1501,56
19:55	1417,01	1502,02
19:58	1252,12	1500,01
20:02	1012,52	1497,56
20:05	820,86	1496,99
20:08	650,01	1496,78
20:11	681,32	1501,08
20:14	905,02	1498,89
20:17	1212,98	1502,34
20:20	1582,25	1503,12
20:23	1895,71	1501,03
20:26	2326,08	1498,02
20:29	2554,45	1502,54
20:32	2514,32	1498,06

Fuente: Autores del proyecto

En base a los valores de la tabla 3, se procede a calcular el porcentaje de reducción en las emisiones luego de implementar el controlador automático a nivel de software.

Consolidamos el total de emisiones en los diferentes modos de operación:

$$T_{em} = 55640.48$$

$$T_{ec} = 47218.89$$

T_{em} = Total emisiones en modo manual

T_{ec} = Total emisiones en modo automático

Se procede a calcular la diferencia entre los dos modos de operación D_t :

$$D_t = T_{em} - T_{ec} = 8421.59$$

Por último, se calcula el porcentaje en la reducción de emisiones P_r :

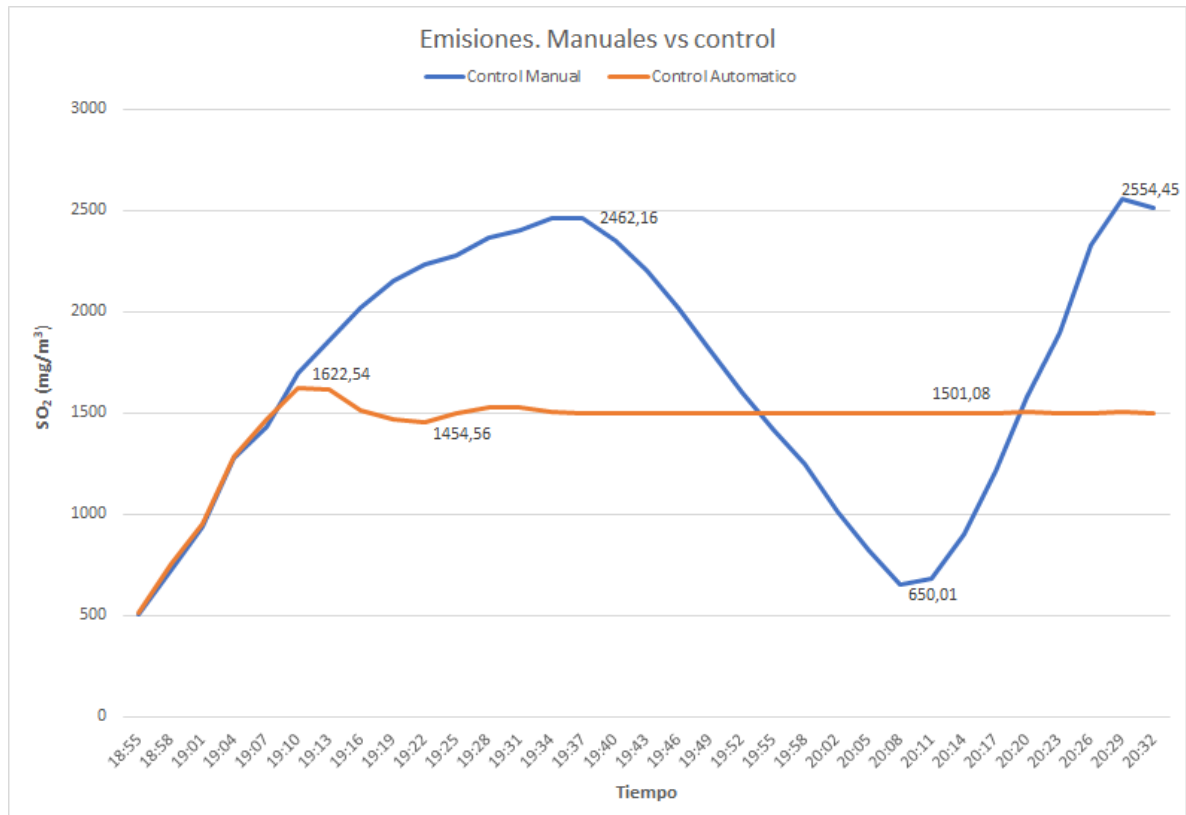
$$P_r = \frac{D_t}{T_{em}} * 100$$

$$P_r = \frac{8421.59}{55640.48} * 100$$

$$P_r = 15\%$$

Con el sistema de control automatizado propuesto se busca estabilizar los valores de emisiones en rangos legalmente permitidos alrededor de 1500 mg/m³, ayudando a disminuir el consumo de caliza y la generación de los residuos. Con las simulaciones realizadas se logra evidenciar la estabilización de las emisiones a través de la correcta adición del sorbente al proceso, estimando una reducción del 15% de las emisiones.

Figura 15. Grafica comparativa de emisiones en modo manual y modo automático



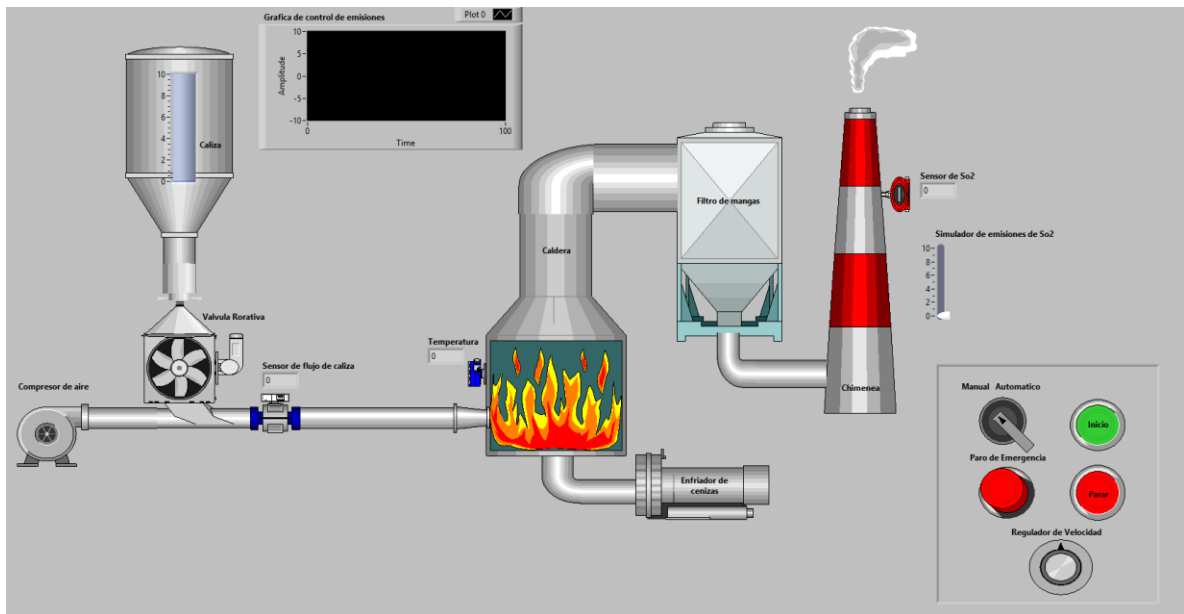
Fuente: Autores del proyecto

En la gráfica 15 se evidencia la estabilización de las emisiones luego de implementar el controlador automático, mostrando la diferencia en el comportamiento de la variable SO₂ la cual tiende a estabilizarse en el tiempo mientras que en modo manual se notan elevadas fluctuaciones producto de la ausencia de control.

Si bien es cierto que la caliza es un agente utilizado en los procesos de desulfuración de las calderas de tipo lecho fluidizado circulante y por ende nos ayuda a capturar el azufre contenido en el carbón, también puede afectar la eficiencia energética al aplicarse de una forma descontrolada y desproporcionada, debido que esta incide de cierta forma en la disminución de las temperaturas dentro de la caldera, a su vez también incurre en sobre costos energéticos por excesos de aire producidos por los sopladores o ventiladores aplicados al proceso, también observamos que el

almacenamiento de los residuos es un grave problema, especialmente si el agua de lluvia puede arrastrar estos depósitos al subsuelo. El sulfato cálcico producido en el proceso es un producto de desecho seco cuya eliminación puede plantear problemas, igualmente En operaciones no catalíticas a alta temperatura, la aglomeración y sinterización de las partículas finas puede requerir un descenso en la temperatura de trabajo, reduciéndose así la velocidad de la reacción de forma considerable (Carlos Baldasquín Cáceres, 2010)

Figura 16. Interfaz con la cual se adiciona material de caliza pulverizado para el proceso de desulfuración de los gases.

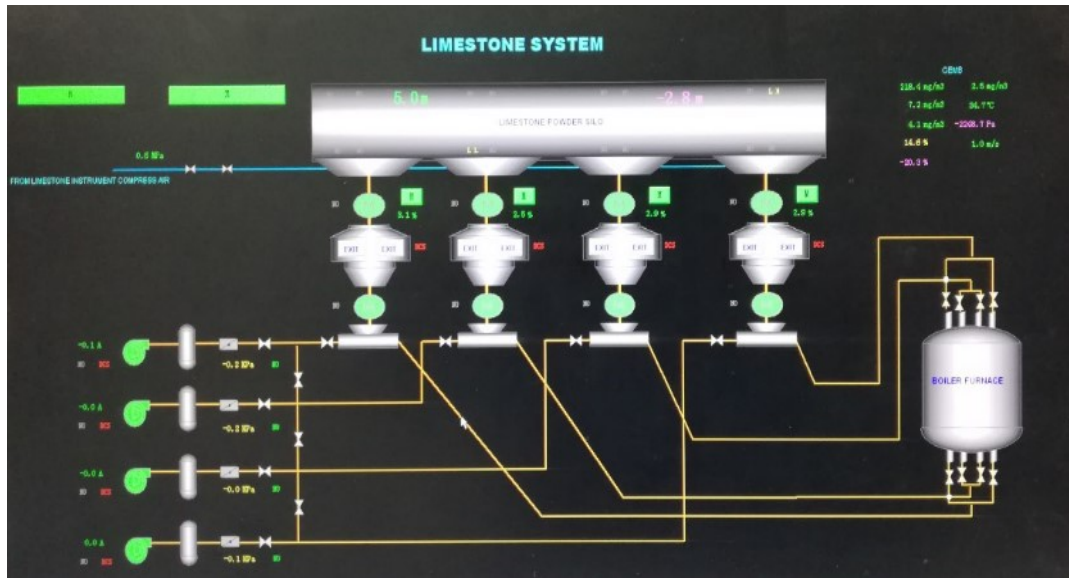


Fuente: Autores del proyecto

En la figura 14 se muestra la interfaz gráfica con la cual el operador interactuara para el control del sistema. A través de un indicador de nivel se podrá visualizar los niveles en la tolva de caliza, un sensor de flujo mostrará la cantidad de material sorbente aplicado para controlar las emisiones de SO₂, un sensor de temperatura permitirá conocer los valores de temperatura dentro de la caldera y por último

tenemos un sensor de emisiones que nos mostrará el valor de las emisiones a cada momento.

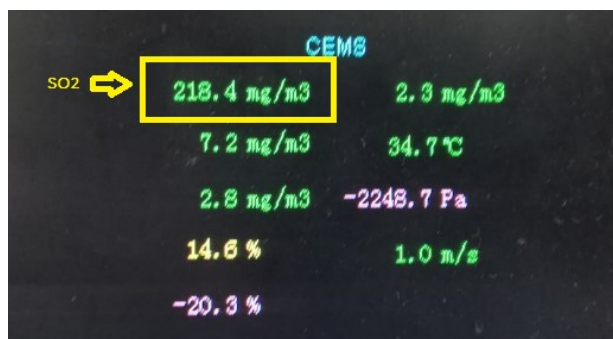
Figura 17. HMI del sistema de adición de caliza.



Fuente: *Symphony plus*. Versión 2.0.4. 2015. ABB

En la figura 15 podemos observar el silo de almacenamiento de caliza, los emisores con sus respectivas válvulas de entrada y salida. También se muestra los ventiladores usados para el transporte de caliza hacia la caldera.

Figura 18. Indicación de valores de emisiones de gases contaminantes presentes en el proceso (SO₂ encerrado en rectángulo Amarillo)



Fuente: *Symphony plus*. Versión 2.0.4. 2015. ABB

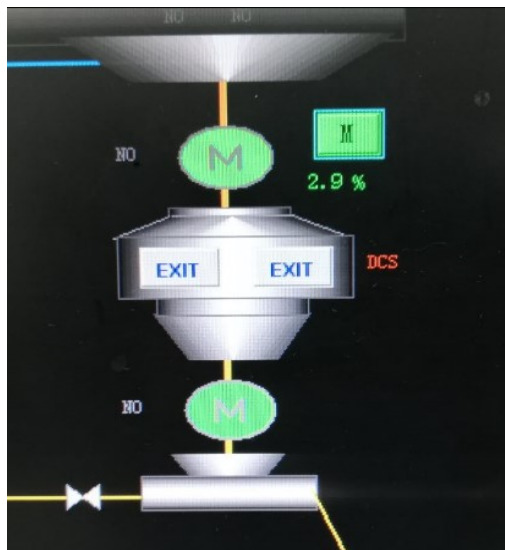
Aquí se muestran todos los valores de los gases presentes en el proceso de combustión.

Figura 19. Pantalla emergente en la cual se indica el rango de valores de emisiones de SO₂ en unidades de mg/m³.



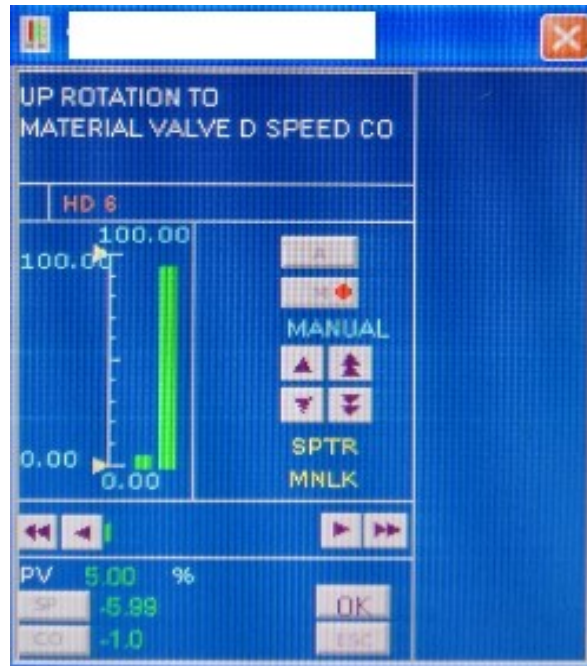
Fuente: *Symphony plus*. Versión 2.0.4. 2015. ABB

Figura 20. Válvula rotativa para control de descarga manual del material sorbente, su uso es de forma manual, se realiza a criterio de cada operador encargado del proceso



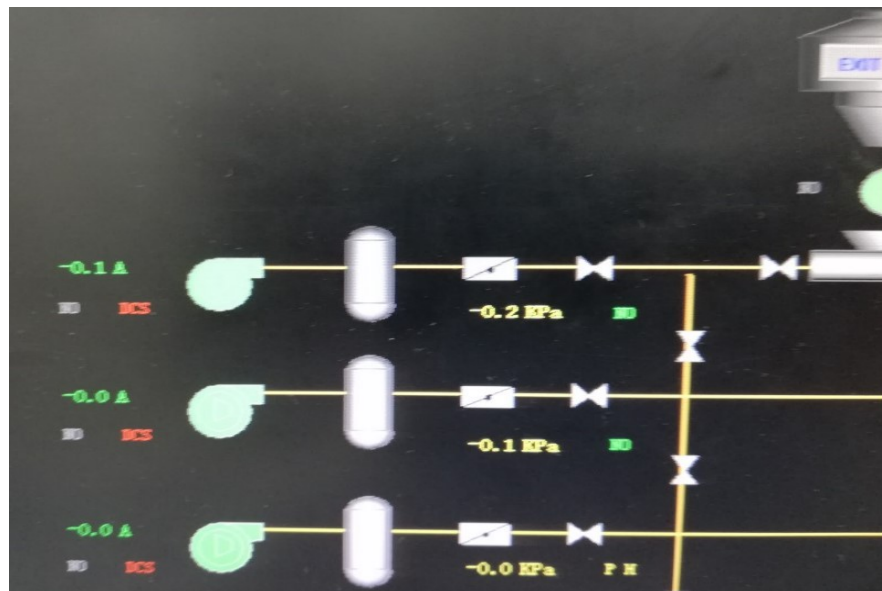
Fuente: *Symphony plus*. Versión 2.0.4. 2015. ABB

Figura 21. Pantalla emergente en la cual se controla porcentualmente la velocidad de la válvula rotativa de forma manual



Fuente: *Symphony plus*. Versión 2.0.4. 2015. ABB

Figura 22. Sistema de inyección de aire comprimido para la adición del material sorbente



Fuente: *Symphony plus*. Versión 2.0.4. 2015. ABB

Las figuras 15,16,17,18,19 y 20, fueron tomadas de un computador ubicado en la sala de ingeniería de la empresa Térmica 1, el cual cuenta con las licencias requeridas para el normal funcionamiento del software Symphony plus. Versión 2.0.4. 2015 del fabricante ABB.

5. CONCLUSIONES

Con el diseño y ejecución de este proyecto aplicado se da solución a una problemática particular como lo es la aplicación de polvo de caliza en las proporciones requeridas para proceso de desulfuración en una caldera, evitando así desperdicios innecesarios del producto e impidiendo saturar la caldera o el lecho con un volumen exagerado del mismo. Es importante evitar esta condición ya que el hecho de adicionar caliza al proceso de combustión genera una disminución en la temperatura lo que representa una clara reducción en la eficiencia de la caldera. Con el sistema de control automático propuesto se apunta directamente a resolver esta problemática logrando un equilibrio entre material sorbente adicionado al proceso y las emisiones de SO_2 al ambiente.

Gracias a la adecuada identificación de variables involucradas en el proceso de desulfuración en la caldera, se logra un mejor aprovechamiento de los recursos, ya que el hecho de contar con elementos instalados y calibrados bajo estándares nacionales e internacionales para la medición de las variables inmersas en el sistema, representa una ventaja económica para la empresa debido a que se evita la adquisición de dichos componentes, los cuales tienen un alto costo en el mercado de la automatización. Para la implementación de este proyecto aplicado se estarán usando todos los sensores y actuadores utilizados actualmente para el control manual del sistema, a nivel físico solo se realizará la instalación de un PLC en un gabinete de control y las respectivas conexiones eléctricas que apliquen.

La obtención de datos claros sobre el funcionamiento de la planta y su respuesta ante estímulos resulta determinante a la hora de obtener un modelo matemático que describa el comportamiento de ésta. Se realizaron todos los cálculos necesarios que permitieron hacer una aproximación matemática al comportamiento real del sistema, basados en los métodos gráficos y Ziegler Nichols de sintonización de controladores PID, los cuales son ampliamente usados en la industria cuando no se

conoce el modelo matemático de la planta, se logra obtener la respuesta dinámica del sistema en estado estacionario, logrando un control automático que permite disminuir las emisiones de SO_2 y la generación de elevadas cantidades de ceniza, consiguiendo una importante contribución al cuidado del medio ambiente.

Los métodos gráficos resultan una herramienta muy ágil y confiable para estimar la función de transferencia de los sistemas a controlar, permitiendo hacer labores de diseños precisos y ajustables para luego ser implementados, ejecutándolos en procesos reales.

Durante el normal funcionamiento de la planta en modo manual, se lograron capturar datos sobre emisiones registrados en la tabla 3, esos valores muestran elevadas oscilaciones del sistema, luego de diseñar el controlador automático se procede a realizar nuevas simulaciones registrando sus resultados en la misma tabla 3. La comparación de estos valores permite estimar una reducción en las emisiones del 15%, esto indica una notable mejora en la eficiencia de la caldera ya que se estaría consumiendo menos material sorbente y generando menos emisiones contaminantes al ambiente.

Es probable que al momento de la implementación final sobre el sistema se deban reajustar las ganancias del controlador para lograr un ajuste más fino sobre la planta, esta practica resulta normal en casos como este en donde no se conoce con anticipación el modelo matemático de la planta por lo que toca ir aproximando el controlador mediante una serie de pruebas de campo en donde se observa la respuesta del sistema a la entrada de una perturbación, de igual manera el modelo y diseño obtenidos resultan un elemento clave y de gran utilidad para el control de la variable del proceso.

6. RECOMENDACIONES

Debido al excelente comportamiento del modelo aplicado en las simulaciones y la importancia que para el proceso y el medio ambiente generan se recomienda sea implementado en la industria de la generación de energía ya con la automatización del proceso de adición de caliza con este modelo se podría sin duda mejorar la eficiencia en la caldera, disminuir el impacto ambiental y reducir en la producción de ceniza.

Dentro de la propuesta se planea la instalación de un sensor de flujo para poder constatar cual es el consumo de caliza que se tiene dentro del proceso, esto nos permitirá ver la eficiencia del sistema de control propuesto y realizar ajustes que permitan perfeccionar el modelo matemático al sistema real.

BIBLIOGRAFIA

- Benítez Cortés, I., Prieto Montenegro, F., Ramos Sánchez, L., & García. (2006). Estudio a escala piloto de la desulfuración de gases de combustión utilizando sólidos ricos en óxido de calcio. *Revista Cubana de Química*, 107.
- Caballero, A. L., & Medico, O. A. (2013). *Caracterización y posible uso de cenizas resultantes de la combustión del carbón, en la futura Termocentral de lecho fluidizado*. Buenos Aires: VSIR-REDISA. Obtenido de <http://www.redisa.net/doc/artSim2013/CaracterizacionDeResiduosSolidos/Caracterizacion%20Cenizas%20Combustion%20Carbon.pdf>
- Carlos Baldasquín Cáceres, Ó. C. (2010). *Utilización de la piedra caliza en la industria energética*. Cartagena, España. Obtenido de <https://es.scribd.com/document/64369360/Utilizacion-de-la-piedra-caliza-en-la-industria-energetica>
- Crespo, W. (09 de Febrero de 2011). *¿ Que es la Automatización Industrial?* Obtenido de WordPress.com site: <https://automatizacionindustrial.wordpress.com/2011/02/09/queeslaautomatizacionindustrial/>
- Creus Sole, A. (2010). *Instrumentación industrial*. Barcelona España: Marcombo S.A.
- Díaz González, M. A. (2016). Obtenido de *Modelo de cálculo de eficiencia térmica de una central de lecho fluidizado en función de la composición del carbón*. Obtenido de Universidad de Chile: <http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/137977/Modelo-de-calculo-de-eficiencia-termica-de-una-central-de-lecho-fluidizado-en-funcion.pdf?sequence=1>

- Fernandez Diez, P. (2017). *Calderas de lecho fluidificado*. Obtenido de <http://files.pfernandezdiez.es/CentralesTermicas/PDFs/16CT.pdf>
- García, R. P. (2003). Apuntes de sistemas de control. En Editorial Club Universitario.
- López García, J. B. (2013). *Diseño y construcción de un sistema de control automático para una caldera piro tubular horizontal*.
- Macías Leal, R. (2016). *DISEÑO DE UNA PLANTA PARA LA CAPTURA DE SO2 Y CO2 DE GASES INDUSTRIALES DE COMBUSTIÓN Y REUTILIZACIÓN DE RESIDUOS DE MINERÍA*.
- Mercader, P., Cánovas Sánchez, C. D., & Baños, A. (2018). Control PID Multivariable de una Caldera de Vapor. *Revista Iberoamericana de Automatica e Informatica Industrial*, 11. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/326295262_Control_PID_Multivariable_de_una_Caldera_de_Vapor
- Minambiente. (2017). *Emisiones Atmosféricas Contaminantes*. Obtenido de <http://www.minambiente.gov.co/index.php/component/content/article/1833-plantilla-asuntos-ambientales-y-sectorial-y-urbana-21#normativa-fuentes-fijas>
- Ministerio de Ambiente, V. y. (05 de Junio de 2008). <http://www.minambiente.gov.co>. Obtenido de Resolución 909: <http://www.minambiente.gov.co/images/normativa/app/resoluciones/f0-Resoluci%C3%B3n%20909%20de%202008%20%20-%20Normas%20y%20estandares%20de%20emisi%C3%B3n%20Fuentes%20fijas.pdf>
- National Instruments*. (21 de Octubre de 2012). Obtenido de <http://www.ni.com/white-paper/6440/en/#toc2>

- Nieves Zárate, M. T., & Hernandez Vidal, A. (2016). *Reporte de inversion energetica en colombia*. Bruselas: International energy charter.
- Ogata, K. (2010). *Ingeniería de control moderna (5 ed)*. Madrid, España: PEARSON.
- Rodríguez, N., & Velasco Hurtado, C. (2005). Tecnologías de Desulfuración de Gases. *Revista Metalúrgica UTO. Versión impresa ISSN 2078-5593*, 29-41.
- Sandra Leticia García-Arreola, J. M.-S.-R. (24 de Diciembre de 2009). Neutralización del trióxido de azufre con hidróxido de magnesio en la combustión de hidrocarburos pesados. *Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal*. Recuperado el 05 de noviembre de 2017, de <http://www.redalyc.org/html/482/48213841006/>
- SICK. (2015). *Continuous Emission Monitoring System*. Beijing: SICK MAIHAK.
- Station, C. (s.f.). Obtenido de <https://controlstation.com/educating/software-tools/>
- Temboury Villarejo, J. (1991). Retención de contaminantes, Prevención de superación de límites. *Cuadernos de estrategia, ISSN 1697-6924, N° 34*, 123-175.
- Turmero, P. (s.f.). *El control industrial*. Obtenido de Monografias: <http://www.monografias.com/trabajos101/control-industrial/control-industrial.shtml>
- Velasco, C. (2005). *www.revistasbolivianas.org.bo/*. Obtenido de http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:http://www.revista-sbolivianas.org.bo/pdf/rmuto/n26/n26_a05.pdf

ANEXOS

Sistemas de combustión en lecho fluido. Recuperado de:

http://ocw.uniovi.es/pluginfile.php/1011/mod_resource/content/1/1C_C12757_0910/04_GT13_Centrales_termicas_de_lecho_fluido.pdf

Control y eliminación de los SO₂. Recuperado de:

http://manager.redsauce.net/AppController/commands_RSM/api/api_getFile.php?itemID=203&propertyID=20&RStoken=59e8ac1045d03e2ff6564c0638315f38

M. L. Blázquez, A. B. (1991). Desulfuración de carbones. Métodos químicos.

Recuperado de:

<http://webs.ucm.es/info/biohidro/Publicaciones%20del%20Grupo/Canteras%20Explotaciones,%20mayo%201991,40.pdf>