

## **Sistema de control de la combustión por el método calorimétrico a lazo cerrado del flujo de vapor y el aire en caldera de bagazo RETAL**

Combustion control system by the closed-loop calorimetric method of the flow of steam and air in a bagasse boiler RETAL

Magdelén Bazán-de los Santos<sup>1\*</sup> <https://orcid.org/0000-0003-2063-3692>

Mónica Mulet-Hing<sup>1</sup> <https://orcid.org/0000-0002-1836-3593>

Angela Giralt-Sánchez<sup>1</sup> <https://orcid.org/0000-0002-1704-0178>

Dpto. de Ingeniería en Automática. Universidad de Oriente. Santiago de Cuba, Cuba

\*Autor para la correspondencia. correo: [magdalen@uo.edu.cu](mailto:magdalen@uo.edu.cu)

### **RESUMEN**

La industria azucarera desempeña un papel importante dentro de la economía nacional, es por ello que la eficiencia de la operación de los principales parámetros de los diferentes equipos e instalaciones que la componen incide considerablemente en la producción de azúcar, una de las causas que acentúan este comportamiento, lo constituye el avanzado grado de envejecimiento de las instalaciones industriales y la existencia de una mínima automatización de los procesos. Este trabajo se desarrolla en el contexto de la Unidad Empresarial de Base (UEB) Central Azucarero “Argeo Martínez” en el municipio Manuel Tames, provincia Guantánamo, en el área de Generación de Vapor, con el objetivo de diseñar un sistema de automatización para el control de la combustión del bagazo en el generador de vapor del Central Azucarero. Se utilizó el método de las oscilaciones permanentes para diseñar el controlador de presión y el controlador

del flujo de aire. La estrategia de control definida es propicia para el control de la combustión por el método calorimétrico, lo cual fue comprobado mediante simulación. Con el empleo de herramientas de identificación se obtuvieron los modelos matemáticos que describen los procesos de variación de presión de vapor, flujo de vapor y flujo de aire de la caldera bagacera; la presión de vapor y el flujo de aire se comportan como un modelo de segundo orden con retardo para ambos casos y el flujo de vapor como un modelo de segundo orden con retardo con un cero.

**Palabras clave:** generador de vapor; combustión; bagazo, controlador.

## **ABSTRACT**

The sugar industry plays an important role in the national economy, which is why the efficiency of the operation of the main parameters of the different equipment and facilities that comprise it has a considerable impact on sugar production, one of the causes that accentuate this behavior, is constituted by the advanced degree of aging of the industrial installations and the existence of a minimum automation of the processes. This work is developed in the context of the Base Business Unit (UEB) Central Azucarero "Argeo Martínez" in the Manuel Tames municipality, Guantánamo province, in the Steam Generation area, with the objective of designing an automation system for the control of the combustion of bagasse in the steam generator of the Central Azucarero. The permanent oscillations method was used to design the pressure controller and the airflow controller. The defined control strategy is conducive to combustion control by the calorimetric method, which was verified by simulation. With the use of identification tools, the mathematical models that describe the processes of variation of steam pressure, steam flow and air flow of the bagasse boiler were obtained; vapor pressure and airflow behave as a second-order lagging model for both cases and vapor flow as a second-order lagging model with a zero.

**Keywords:** Steam Generator; combustion; bagasse; controller.

Recibido: 10/04/2022

Aceptado: 18/07/2022

## Introducción

El generador de vapor o caldera, como su nombre lo indica, tiene la función de producir vapor para ser utilizado en la generación de energía mecánica o eléctrica y para la alimentación a equipos de proceso. Hoy en día este equipo es un elemento esencial en el funcionamiento de prácticamente todas las empresas industriales. No erróneamente se ha llegado a plantear, que el generador de vapor es el corazón de toda industria moderna.

Las calderas corresponden al equipo principal en las instalaciones industriales de los ingenios azucareros, debido a que la mayor parte del proceso productivo se da a través de su uso funcional, ya sea en el aprovechamiento del vapor que producen para generar electricidad mediante turbogeneradores, o como energía térmica en el proceso de elaboración de azúcar en equipos esenciales como evaporadores y tachos. Las calderas en estos entornos industriales, emplean como principal medio energético la combustión de residuos biomásicos, como el bagazo y el residuo agrícola de caña (R.A.C), resultantes del mismo proceso de elaboración.<sup>(1)</sup>

Para Cuba, país de limitados recursos energéticos, y en el que prácticamente la casi totalidad del vapor y la electricidad se generan a partir de la energía química de los combustibles, la explotación eficiente de sus equipos de generación de vapor tiene objetivamente una importancia vital. Cabe decir, que, en el sector azucarero, uno de sus sectores productivos, hay más de mil generadores de vapor.

Este trabajo fue realizado en el Central Azucarero “Argeo Martínez”, el cual se encuentra ubicado en el valle de Guantánamo, donde al igual que en los demás

centrales del país sus generadores de vapor, también llamados calderas, utilizan el bagazo como combustible. Este se quema en el horno u hogar de la caldera inmediatamente después de que la caña sale de los molinos.<sup>(2)</sup>

Actualmente el método de control de la combustión de este combustible natural es realizado por un operario, el cual no posee ninguna instrumentación para conocer si el proceso está ocurriendo de forma óptima, sus basamentos son totalmente empíricos; por lo que es considerable el efecto negativo del error humano sobre este proceso, generando un mal uso o aprovechamiento del combustible.

Este aspecto se convierte directamente en pérdidas económicas valiosas para la entidad y que a su vez, se puede considerar como desperdicio de un recurso no renovable. Por lo tanto el objetivo de ésta investigación es el diseño de un Sistema de Automatización para el control de la combustión del bagazo en el generador de vapor del Central Azucarero “Argeo Martínez”.

## **Materiales y métodos**

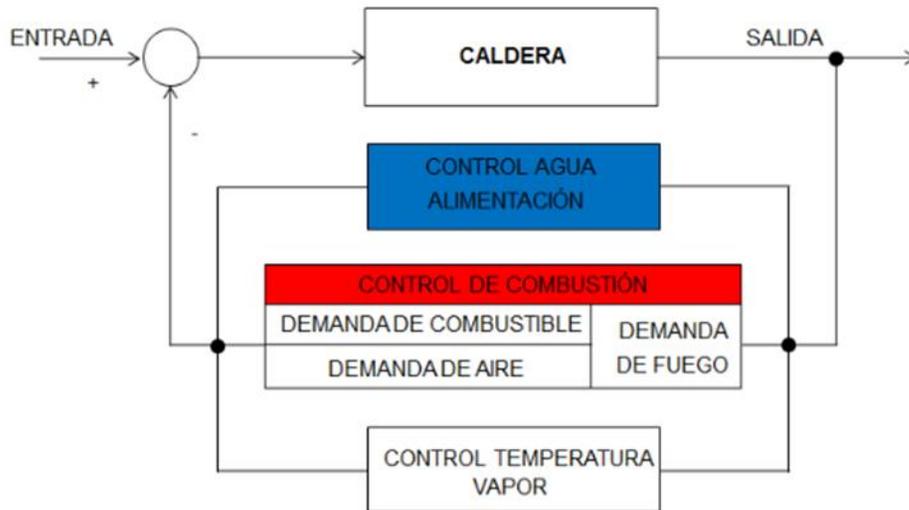
El generador de vapor es un equipo complejo, en el que se entremezclan fenómenos de reacciones químicas, transferencia de calor, hidrodinámica del agua y de la mezcla agua - vapor, flujo de gases y resistencia de materiales sometidos a altas presiones y temperaturas; todos estos procesos ocurren en un equipo que reclama para su correcta explotación y mantenimiento un cuidado extremo y un conocimiento profundo de sus características.<sup>(3)</sup>

### **Sistemas de control en calderas bagaceras**

Los generadores de vapor de bagazo como objetos de control automático se caracterizan por ser plantas muy complejas integradas por múltiples equipos y dispositivos que presentan una gran interacción y que funcionan en condiciones de elevada presión y temperatura. Es por ello que estos equipos deben ser operados de forma tal de obtener un funcionamiento eficiente y seguro que garantice la obtención del caudal requerido de vapor de calidad con un mínimo

consumo de bagazo, así como con la menor contaminación posible del medio ambiente.<sup>(4)</sup>

Las medidas de las variables involucradas con el proceso proporcionan al sistema la información necesaria para ello. En la figura 1, se muestra mediante un diagrama de bloques el esquema general del control de una caldera.<sup>(4)</sup>



**Fig. 1-** Esquema general de control en la caldera

Desde el punto de vista del equilibrio energético se debe generar una demanda de carga (de fuego), de la cual se generan a su vez las demandas de combustible y aire, que proporcionan el aporte de energía necesario para mantener el equilibrio respecto a la extracción o consumo de vapor. El control de nivel es el encargado de mantener el equilibrio entre la masa saliente en forma de vapor y la entrante en forma de agua. La temperatura del vapor es mantenida mediante el control de temperatura de éste, con su influencia, tanto en el equilibrio de energía como de masa.<sup>(5)</sup>

En el sistema de control de una caldera, las diferentes variables interaccionan sobre los diferentes subsistemas. Así, la demanda de carga influirá sobre la temperatura de vapor, el caudal de agua sobre la presión de vapor que a su vez es la causante de la demanda de carga. Por lo tanto, todo el sistema debe ser coordinado e implementado de forma que minimice los efectos de dichas

interacciones, puesto que el propio diseño del sistema las puede aumentar. La presión de vapor es un excelente indicador del balance energético.

En los generadores de vapor de bagazo existen tres grupos fundamentales de control:

- Control de la combustión;
- Control del agua de alimentación;
- Control de la temperatura del vapor sobrecalentado.

### **Metodología de estudio para la identificación de sistemas**

El proceso para la identificación debe estar guiado por una secuencia lógica que es de vital importancia cumplir, esta representa la guía para llevar a cabo un buen desempeño del experimento y la obtención del modelo capaz de describir el comportamiento del sistema. Las metodologías de estudio para la identificación se describen a continuación:

I. Obtención de datos de entrada - salida: Para ello se debe excitar el sistema mediante la aplicación de una señal de entrada y registrar la evolución de sus entradas y salidas durante un intervalo de tiempo.

II. Tratamiento previo de los datos registrados: Los datos registrados están generalmente acompañados de ruidos indeseados u otro tipo de imperfecciones que puede ser necesario corregir antes de iniciar la identificación del modelo. Se trata, por tanto, de preparar los datos para facilitar y mejorar el proceso de identificación.

III. Elección de la estructura del modelo: Si el modelo que se desea obtener es un modelo paramétrico, el primer paso es determinar la estructura deseada para dicho modelo. Este punto se facilita en gran medida si se tiene un cierto conocimiento sobre las leyes físicas que rigen el proceso.

IV. Obtención de los parámetros del modelo: A continuación, se procede a la estimación de los parámetros de la estructura que mejor ajustan la respuesta del modelo a los datos de entrada - salida obtenidos experimentalmente.

V. Validación del modelo: El último paso consiste en determinar si el modelo obtenido satisface el grado de exactitud requerido para la aplicación en cuestión.

Si se llega a la conclusión de que el modelo no es válido, se deben revisar los siguientes aspectos como posibles causas:

- El conjunto de datos de entrada - salida no proporciona suficiente información sobre la dinámica del sistema.
- La estructura escogida no es capaz de proporcionar una buena descripción del modelo.
- El criterio de ajuste de parámetros seleccionado no es el más adecuado.

### **Diseño y ejecución del experimento**

La identificación de sistemas es típicamente un proceso de prueba y error, en el cual se estiman y validan diferentes tipos de modelos hasta encontrar el más sencillo, que se adapte y represente a la vez la dinámica del sistema. Los experimentos se realizaron para los procesos de variación de la presión de vapor, flujo de vapor y flujo de aire de la caldera bagacera.

Para la excitación del sistema se empleó una señal paso escalón, la cual es una señal que produce resultados a corto plazo y a la vez es una de las señales más empleadas en la actualidad para realizar el proceso de identificación.<sup>(6)</sup>

Para realizar la identificación se llevó la interfaz de comunicación (EROS) a régimen manual y se procedió a dar el paso escalón en el Ventilador tiro Forzado (VTF), lo que se traduce en una variación de la frecuencia de 25 % a 40 % para el caso del flujo de aire operando de la misma forma sobre la presión de vapor en el domo superior, donde se estimula con un paso de 65% a 75%, es decir, un 10 %, que permite incrementar la velocidad de los alimentadores de bagazo a través de los variadores de frecuencias, posibilitando una mayor entrada de combustible y el aumento de la presión en la caldera.

El proceso se mantuvo excitado durante un período de tiempo suficiente para la recolección de las muestras. Una vez concluida la excitación del proceso se salvan los valores obtenidos del histórico del software de monitorización en un fichero compatible con Microsoft Excel y se procede a la obtención del modelo que con mayor exactitud describa el comportamiento de la respuesta del sistema. Como recomendación de los operarios del proceso se toma un tiempo de muestreo de 1 segundo para no perder ninguna información valiosa respecto a las muestras y al comportamiento de la respuesta del sistema.

### **Validación del modelo**

Cuando un modelo ha sido obtenido a partir de datos experimentales, es necesario examinar el mismo para conocer en qué medida el modelo obtenido se ajusta a las mediciones realizadas.

La validación permite comprobar si el modelo identificado representa el comportamiento real, teniendo en cuenta las limitaciones de los métodos de identificación y los objetivos finales a partir de los cuales fue concebido.

En general, la mayoría de los métodos de validación tratan de determinar si la respuesta del modelo se ajusta con suficiente exactitud a los datos de entrada/salida obtenidos mediante experimentación.

El primer criterio para validar tenido en cuenta fue el cálculo del juste (FIT), el cual expresa el porcentaje de la salida que el modelo reproduce. El comportamiento de la salida del modelo de la presión de vapor en el domo superior (fit=76,29 %), el flujo de vapor (fit= 80,91 %) y de flujo de aire (fit= 83,49 %) fueron los valores obtenidos.

Si se comprueba que las relaciones porcentuales de la media del error de simulación y de la media del error de predicción respecto a la media de la salida medida son menores que el 5 %, entonces se puede afirmar que el modelo es válido para ser utilizado en los procesos industriales.

Como se puede apreciar en la tabla 1 la validación de los modelos obtenidos demuestra que los mismos son admisibles en la descripción de los procesos de

variación de presión de vapor, de flujo de aire y flujo de vapor ya que presentan un % FIT superior al 75 % y los errores de simulación y de predicción son menores al 5 %.

**Tabla 1-** Criterios para evaluar la calidad de los modelos

Modelos	%FIT	%ES	%EPF
P2D(Presión de vapor)	76,29	0,3205	1,7148
P2D(Flujo de aire)	83,49	0,2291	0,2293
P2DZ (Flujo de vapor )	80,91	0,2869	0,3895

71

### **Método utilizado para el diseño de los controladores**

Existen diversos métodos para el ajuste de los controladores, entre los que se encuentran:

- Métodos de oscilaciones permanentes (MOP).
- Métodos de oscilaciones amortiguadas.
- Método de la curva de reacción.

El método utilizado fue el de las oscilaciones permanentes de Ziegler-Nichols, el cual se basa en llevar el proceso a oscilar de forma continua y mantenida en su amplitud, para disponer de la ganancia y período de oscilación críticos del sistema y en función de éstos realizar el cálculo de sintonizado del controlador.<sup>(7,8)</sup>

## **Análisis y discusión**

Para la operación eficiente de la caldera, es muy importante el control de la presión de vapor en el domo, este controla de forma automática los cambios de carga del proceso accionando por el variador, el alimentador de bagazo y para el tiro forzado el lazo de control entre el flujo de vapor y el flujo de aire primario que se suministra al horno.

El control entre el flujo de vapor y el flujo de aire primario, se basa en que el flujo de vapor es equivalente al combustible de bagazo que se está alimentando al horno, es decir, el índice de generación del bagazo consumido por 2,2 será equivalente al vapor que se está consumiendo en la caldera, esta experiencia se utiliza también en Brasil, por la complejidad de medir el flujo de bagazo y por lo inexacto que resulta alimentar el combustible al horno, por la velocidad de los alimentadores de bagazo.

Este Sistema de Control de la combustión por el método calorimétrico (figura 2), se hace con un concepto distinto para el suministro del flujo de aire al horno, el esquema paralelo sigue funcionando cuando disminuye la presión de vapor, el regulador aumenta la salida y se incrementa la velocidad de los alimentadores de bagazo y el flujo de aire al horno en lazo abierto, pero el lazo cerrado del flujo de vapor y del aire, rectifican el aire para que siempre el flujo de aire sea igual al flujo de vapor y este se corresponde con el flujo de bagazo al horno.

El sistema calorimétrico con el lazo cerrado de flujo de aire en correspondencia con el flujo de vapor, funciona muy parecido cuando el esquema de combustión cuenta con un sensor de Oxígeno, que en lazo cerrado rectifica el flujo de aire al horno.

En el calorimétrico es importante una medición del flujo de vapor confiable, y se tendrá siempre un exceso de aire constante en correspondencia al flujo de bagazo.

Este sistema calorimétrico atenúa la cantidad excesiva del flujo de aire al horno cuando exista un fallo corto del bagazo, porque al caerse la presión de vapor, se incrementa la salida del regulador al máximo y al mismo tiempo los ventiladores a su máxima velocidad y flujo enfría el horno; con el lazo de flujo de vapor y aire, al

disminuir la presión va disminuyendo el flujo de vapor y ésta manda a disminuir el flujo de aire.

Observe que el flujo de aire primario del forzado, suministra el aire que participa en la combustión para el aire bajo parrilla y se complementa con el 50 % del aire secundario a los alimentadores de bagazo y el resto del mismo, para 2 niveles de toberas de la pantalla trasera, y 2 niveles de toberas de las pantallas delanteras.

Con este sistema de control de presión y combustión por el método calorimétrico, midiendo y controlando siempre a lazo cerrado el flujo de aire óptimo para la combustión, se trata de lograr los objetivos propuestos utilizando la tabla de relación combustible - aire en función de flujo de vapor consumido para una caldera de 45 t/h y 60 t/h, para mantener constante la presión de vapor de la caldera y eficiente control de la combustión.

De todo lo anterior se desprende la importancia de lograr una adecuada preparación y organización del proceso de la combustión en el horno de las calderas, que ésta se realice de forma completa con el mínimo de exceso de aire, solo el necesario para que se realice una combustión óptima y eficiente.<sup>(9)</sup>

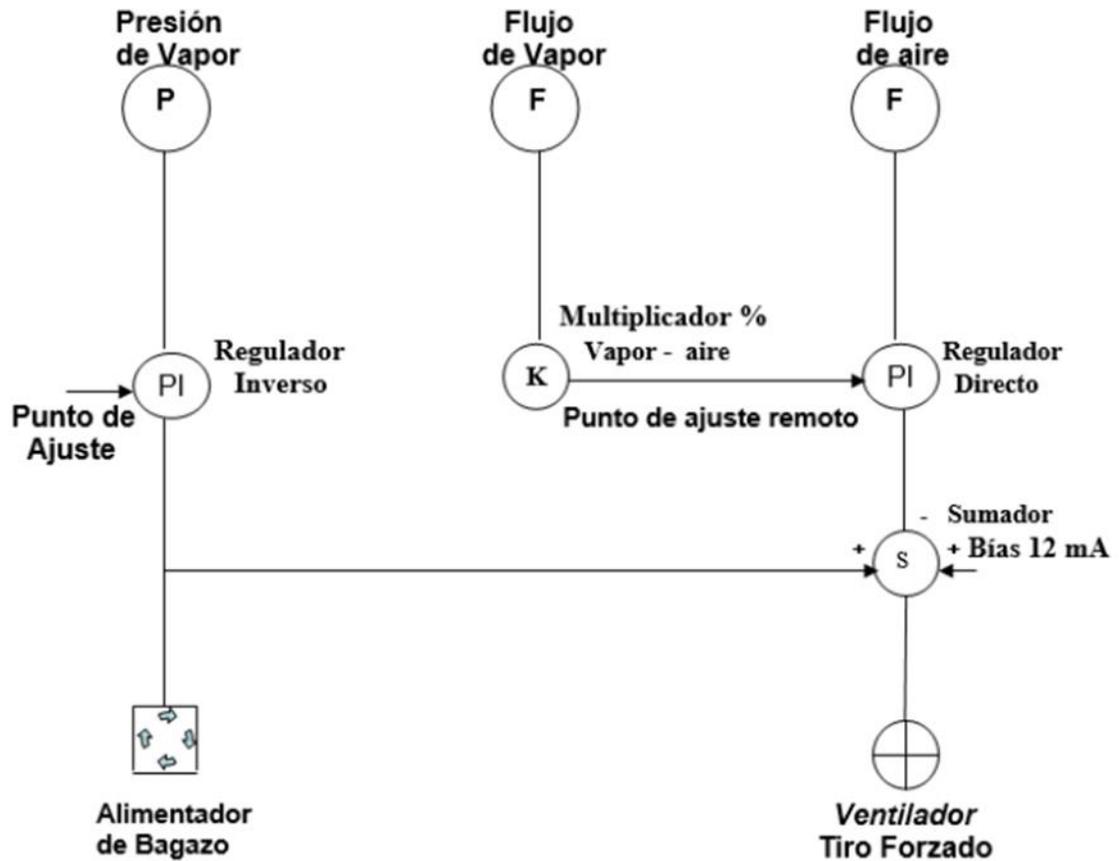


Fig. 1- Esquema de control calorimétrico

### Diseño del controlador de presión

Para diseñar el controlador de presión se utilizó el método de las oscilaciones permanentes. Los valores obtenidos para frecuencia y ganancia crítica respectivamente  $w_{crit}$  y  $K_{crit}$  fueron:

$$w_{crit} = 3,24 \text{ rad/s} \quad K_{crit} = 6,789$$

Con estos valores se determinan los parámetros del controlador de presión mostrados en la tabla 2 de Ziegler- Nichols.

**Tabla 2-** Ziegler-Nichols para el controlador de presión

Controlador	<u>Kp</u>	Ki	<u>Kd</u>
P	3,39		
PI	3,05	1,89	
PID	4,07	4,23	0,97

Se decidió comparar la respuesta obtenida con los controladores PI y PID porque se desea un error de estado estacionario de valor cero.

En la tabla 3 se muestra el máximo sobreimpulso (Mp) y el tiempo de establecimiento Ts para cada respuesta.

**Tabla 3-** Parámetros de la respuesta transitoria analizados

Controlador	<u>%Mp</u>	<u>Ts</u>
PI	15	749
PID	21	74

El mejor comportamiento lo tuvo el regulador PID, pero éste no cumple con el valor deseado de por ciento de pico máximo, por lo que se realizó un ajuste fino del controlador. Mediante el método de prueba y error se obtienen los valores

siguientes:  $K_p = 3,49$ ,  $K_i = 4,5$  y  $K_d = 1$ . El %  $M_p$  es de 3,1 % y el tiempo de establecimiento de 105 s este último aumentó. Estos valores están en el intervalo considerado como aceptable en la operación normal de la caldera.

### Diseño del controlador de flujo de aire

Para diseñar el controlador del flujo de aire se utilizó de igual manera el método de las oscilaciones permanentes. Los valores obtenidos para  $W_{crit}$  y  $K_{crit}$  fueron:

$$W_{crit} = 6,256 \text{ rad/s} \quad K_{crit} = 9,235$$

Con estos valores se determinan los parámetros del controlador de presión mostrados en la tabla 4 de Ziegler-Nichols.

**Tabla 4-** Ziegler-Nichols para el controlador de flujo de aire

Controlador	$K_p$	$K_i$	$K_d$
P	4,61		
PI	4,15	3,16	
PID	5,54	11,8	0,69

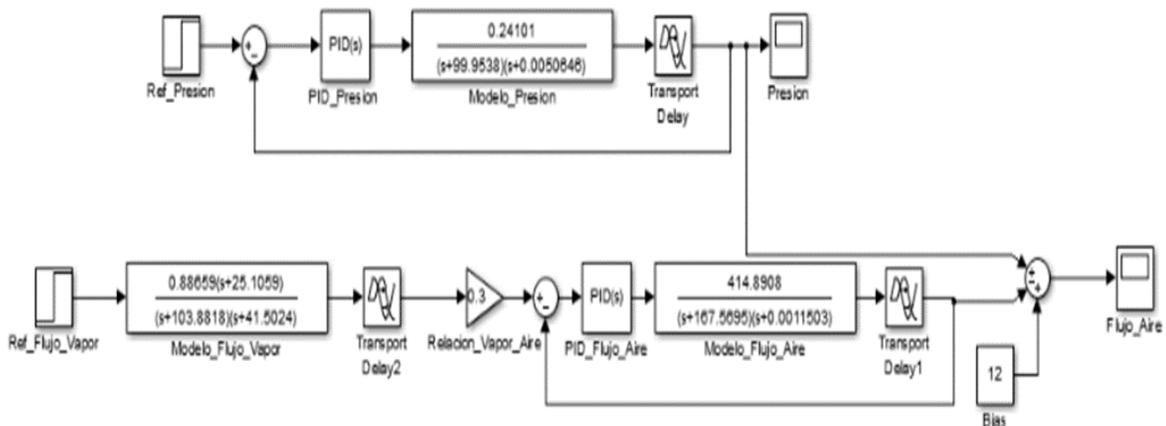
Se decidió comparar la respuesta obtenida con los controladores PI y PID porque se desea un error de estado estacionario de valor cero.

En la tabla 5 se muestra el %  $M_p$  y  $T_s$  para cada respuesta:

**Tabla 5-** Parámetros de la respuesta transitoria analizados

Controlador	%Mp	Ts
PI	44	265
PID	19,33	97

El mejor comportamiento lo tuvo el regulador PID, aunque su respuesta es aceptable se puede mejorar, por lo que se realizó un ajuste fino del controlador. Mediante el método de prueba y error se obtienen los valores siguientes:  $K_p = 4,11$ ,  $K_i = 14,3$  y  $K_d = 0,85$ . Se obtuvo un tiempo de establecimiento de 91s. Una vez diseñados cada uno de los controladores fundamentados en la estrategia de control, se fijó la relación de aire – vapor igual a 0,3. El diagrama en bloques del sistema de control de la combustión de la caldera basado en el esquema calorimétrico se muestra en la figura 3.



**Fig.3-** Diagrama en bloques del sistema de control de combustión en la caldera

## Conclusiones

La presente investigación integró el estudio del comportamiento dinámico de las calderas mediante el análisis del sistema de control actual en el equipo en cuestión. Esto sirvió posteriormente para tomar decisiones sobre el criterio de control utilizar.

Con el empleo de herramientas de identificación, se obtuvieron los modelos matemáticos que describen los procesos de variación de presión de vapor, flujo de vapor y flujo de aire de la caldera bagacera; la presión de vapor y el flujo de aire se comportan como un modelo de segundo orden con retardo para ambos casos y el flujo de vapor como un modelo de segundo orden con retardo con un cero.

Se efectuaron las simulaciones y el ajuste del controlador empleando el asistente Matlab R2015@.

Se diseñó el sistema de control de la combustión en la caldera de tubos de agua del Central "Argeo Martínez", basado en el método calorimétrico. Para ello fue necesario diseñar el controlador de presión y de flujo de aire.

El desarrollo de este proyecto de investigación traería consigo una mayor eficiencia en la producción del Central "Argeo Martínez", logrando una combustión adecuada y una presión de vapor estable en la línea de suministro a los procesos productivos, eliminando las perturbaciones producidas por la demanda de vapor; además mejoraría el consumo de combustible que se traduce en un ahorro económico para el centro.

## Referencias bibliográficas

1. SMITH & CORRIPIO. "Control Automáticos de Procesos". Editorial Limusa S.A. De C.V. (30 junio 2006). ISBN 13: 978-968-18-3791-4
2. HUGOT, E. Hugot, E. y Jenkins, G. H. Handbook of cane sugar engineering. Amsterdam. ISBN: 978-044-44-2438-9. Disponible en: <http://books.google.es/books?id=hNdxQgAACAAJ>. 1986.

3. MEZU VILLEGAS, J. Diseño del lazo de control de combustión para la regulación del vapor vivo en una caldera Industrial [Tesis de diploma]. Universidad Autónoma de Occidente. Santiago de Cali, Colombia 2012.
4. PONS HERNANDEZ, A. Termodinámica técnica para ingenieros químicos. La Habana: Editorial Pueblo y Educación, 1987. ISBN: 978-959-07-1011-7
5. PÉREZ V., M., “Diseño del sistema automatizado para el control de la combustión de la caldera bagacera No.2 del Central 30 de noviembre” [Tesis de diploma]. CUJAE, La Habana, Cuba 2018.
6. OGATA, Katsuhiko. “Ingeniería de Control Moderna”. Tomo I y II. Edición Revolucionaria, 1997. Cuba. ISBN 978 8 48 32266 05.
7. TREJO, V., “Identificación experimental de sistemas”, Editorial ISPJAE, 1986, Cuba. Publicación interna.
8. AGUADO, A. Temas de Identificación y Control Adaptable. Instituto de Cibernética, Matemática y Física, La Habana. 2000. ISBN 978-959-7056-11-9
9. VALDÉZ, A. Uso eficiente del vapor en el proceso de azúcar crudo o blanco directo. *Revista ATAC*. 2015, **76**(2), p.34-38.

### **Conflicto de interés**

Los autores declaran que no hay conflictos de intereses

### **Contribución de los autores**

Magdelén de Los Santos Bazán: recolección y procesamiento de datos.

Mónica Mulet Hing: simulación y redacción de artículo.

Angela Giralt Sánchez: revisión y corrección del artículo.