

**DISEÑO PARA LA INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL DE UNA VARIABLE
PARA LA CALDERA DEL LABORATORIO DE MECATRÓNICA**

CRISTIAN FELIPE JIMENEZ ACOSTA
JOSE MARIANO MARTINEZ PAREJA

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
FACULTAD DE TECNOLOGÍAS
PEREIRA
2015

**DISEÑO PARA LA INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL DE UNA VARIABLE
PARA LA CALDERA DEL LABORATORIO DE MECATRÓNICA**

CRISTIAN FELIPE JIMENEZ ACOSTA
JOSE MARIANO MARTINEZ PAREJA

Proyecto de grado para optar el título de Ingeniero en Mecatrónica.

Director
HENRY WILLIAM PEÑUELA

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
FACULTAD DE TECNOLOGIAS
PEREIRA
2015

NOTA DE ACEPTACION

Presidente del Jurado

Jurado

Jurado

DEDICATORIA

A mis padres que con gran esfuerzo y sacrificio hicieron lo posible para ver mis sueños convertidos en realidad, sueños que comparto con ellos, con el deseo de salir adelante superándome cada día y llenar a mis padres con logros que han sido posible gracias a sus esfuerzos.

A mi hermana Laura Daniela quien me brindó su apoyo en el desarrollo del proyecto y ha sido mi compañía quien sabiamente me ha escuchado desde el momento en que nació.

Cristian Felipe Jiménez Acosta

A Dios, por mis creencias debo agradecerle antes que a cualquier otra persona, por darme la lucidez y la perseverancia para alcanzar mis sueños.

A mis padres, gracias por darme el suficiente valor para afrontar cada dificultad que se me presento en este proyecto que estoy culminando. A ellos debo lo que soy y lo que he logrado, de ahí las gracias por ayudarme de todas las formas posibles, para que yo creciera como persona y esté cumpliendo uno de los grandes sueños que tengo hasta el momento.

A mi hermana, agradezco de corazón todos los momentos donde me escucho mis ideas, donde me dio consejos muy valiosos para poder aclararlas y poderlas sacar a flote, como es este proyecto.

A mi esposa Ángela, doy inmensas gracias por darme el espacio necesario para culminar mis estudios y por estar a mi lado en cada una de las situaciones que nos ha tocado vivir. Gracias por ser el aliento que me anima a cumplir cada sueño.

José Mariano Martínez Pareja.

*Porque mejor es la sabiduría que las piedras preciosas;
Y todo cuanto se puede desear, no se compara con ella.*

Proverbios 8:11

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Tecnológica de Pereira, que es nuestra alma mater donde encontramos el espacio y los conocimientos necesarios, donde nos hemos formado académica y personalmente.

Al programa que nos acogió entre sus estudiantes, donde conocimos un mundo nuevo a través de las Ciencias Mecatrónicas, formándonos para la vida laboral, con los conocimientos necesarios para enfrentar cualquier reto.

Al ingeniero Henry Peñuela, quien dirigió el proyecto aportando sus conocimientos y su acompañamiento a lo largo de su desarrollo con el fin de mejorar continuamente.

RESUMEN

El laboratorio de Mecatrónica de la Universidad Tecnológica de Pereira, actualmente tiene una caldera vertical pirotubular, la cual cuenta con una instrumentación análoga y en cuanto a los controles de las variables están dados como elementos electromecánicos con un sistema on/off.

La caldera es de los procesos térmicos más relevantes donde están presentes todas las variables, de ahí la necesidad de realizar un diseño donde se pueda supervisar y controlar cada uno de los procesos que están presentes en el. Dada la importancia y el riesgo presente en ellas se debe garantizar que los parámetros preestablecidos siempre se mantengan, dando seguridad y confianza a quienes la operan y por ende a las instalaciones físicas donde se encuentran ubicadas.

El objetivo de realizar un diseño para la supervisión constante, hace que la investigación dentro del proceso, se centre al reconocimiento de cada uno de los sensores digitales que se desean usar dentro de la instrumentación, el reconocimiento de cada uno de estos debe estar dirigido a la identificación de los parámetros en los cuales debe trabajar, para así lograr que se adapten a las condiciones de trabajo requeridas por la plataforma Arduino.

La intención de hacer una instrumentación digital para la caldera del laboratorio, es convertir este sistema en uno capaz de tener control sobre la variable de presión y poder mostrar en una interfaz hombre-máquina (HMI) las condiciones en las que se encuentra en todo momento el sistema, lo anterior gracias al uso de sensores adecuados a la necesidad de cada variable.

La finalidad de este proyecto es diseñar un sistema controlado y supervisado, que permita a los usuarios del laboratorio hacer procesos y realizar diferentes aplicaciones, de tal manera que estas sean más fáciles gracias a las investigaciones realizadas en este proyecto.

CONTENIDO

LISTA DE TABLAS.....	8
LISTA DE ILUSTRACIONES.....	9
INTRODUCCIÓN.....	11
1. CALDERAS.....	13
1.1 HISTORIA Y GENERALIDADES.....	13
1.2 TIPOS DE CALDERAS.....	15
1.2.1 CALDERAS PIROTUBULARES.....	15
1.2.2 CALDERAS ACUOTUBULARES.....	19
1.3 IDENTIFICACION CALDERA DEL LABORATORIO.....	21
2. DISEÑO INSTRUMENTACIÓN DE LA CALDERA.....	26
2.1 CARACTERIZACIÓN COMPONENTES ACTUALES DE LA CALDERA.....	27
2.2 CARACTERIZACIÓN COMPONENTES PARA EL DISEÑO.....	34
3. DISEÑO CONTROL DE PRESIÓN.....	41
3.1 IDENTIFICACIÓN DEL SISTEMA POR MATRIZ DE HANKEL.....	42
3.2 SELECCIÓN TÉCNICA DE CONTROL.....	50
3.2.1 CONTROL CON PID TIPO I.....	50
3.2.2 CONTROL CON PID TIPO II.....	53
3.2.3 CONTROL POR REUBICACIÓN DE POLOS.....	56
4. DISEÑO INTERFAZ DE USUARIO.....	60
5. ANALISIS DE COSTOS.....	64
5.1 COMPONENTES ELÉCTRICOS.....	64
5.2 ELEMENTOS MECÁNICOS.....	64
5.3 MANO DE OBRA.....	64
5.4 PRESUPUESTO FINAL.....	65
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	66
6.1 CONCLUSIONES.....	66
6.2 RECOMENDACIONES.....	67
7. BIBLIOGRAFIA.....	68

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Datos transferencia de calor caldera económica	18
Tabla 2 Características caldera laboratorio Mecatrónica	22
Tabla 3 Características quemador “SF” oíl buener.	28
Tabla 4 Controlador de presión Honeywell L404F1102.	30
Tabla 5 Control de nivel McDonnell & Miller de agua en la caldera.	31
Tabla 6 Motobomba tanque suministrador de agua.	31
Tabla 7 Tanque de suministro de agua.	32
Tabla 8 Características Arduino Uno	35
Tabla 9 Características sensor se presión	37
Tabla 10 Características sensor de temperatura	38
Tabla 11 Características sensor de nivel	40
Tabla 12 Presupuesto componentes eléctricos	64
Tabla 13 Presupuesto componentes mecánicos	64
Tabla 14 Presupuesto Mano de obra	65
Tabla 15 Costos del proyecto	65

LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1 Caldera con cámara seca	15
Ilustración 2 Caldera con cámara húmeda	16
Ilustración 3 Caldera de Lancashire	17
Ilustración 4 Caldera compacta de tres pases	19
Ilustración 5 Funcionamiento caldera acuotubular	20
Ilustración 6 Caldera laboratorio de Mecatrónica	21
Ilustración 7 Partes Caldera	22
Ilustración 8 Tanque almacenamiento de agua	23
Ilustración 9 Medidores de Nivel	24
Ilustración 10 Manómetros de Presión y Temperatura	24
Ilustración 11 Control de Presión	25
Ilustración 12 Caldera vertical piro-tubular del laboratorio de Mecatrónica.	26
Ilustración 13 Quemador Beckett “SF” oíl buener.	27
Ilustración 14 Controlador de presión Honeywell L404F1102.	29
Ilustración 15 Control de nivel McDonnell & Miller de agua en la caldera.	30
Ilustración 16 Motobomba tanque suministrador de agua IHM turbina TB-150.	31
Ilustración 17 Tanque de suministro de agua.	32
Ilustración 18 Válvula de seguridad	33
Ilustración 19 Plataforma Arduino	35
Ilustración 20 Sensor de presión	36
Ilustración 21 Sensor de temperatura	38
Ilustración 22 Sensor de nivel	39
Ilustración 23 Esquema de control	41
Ilustración 24 Función de transferencia en tiempo continuo	44
Ilustración 25 Función de transferencia discreta	45
Ilustración 26 Identificación del sistema	47
Ilustración 27 Identificación del sistema	48
Ilustración 28 Matriz de Hankel	49
Ilustración 29 Resultados matriz de Hankel	49
Ilustración 30 Respuesta sistema control PID tipo I	52
Ilustración 31 Respuesta controlador PID tipo II	55
Ilustración 32 Algoritmo controlador PID tipo II	55
Ilustración 33 Respuesta controlador PID tipo II con sistema diferente	56
Ilustración 34 Respuesta control por reubicación de polos	58
Ilustración 35 Algoritmo control por reubicación de polos	59

Ilustración 36 Interpolación de los sensores	61
Ilustración 37 Interfaz variables	62
Ilustración 38 Seudocódigo alarma	62
Ilustración 39 Interfaz switches	63
Ilustración 40 Interfaz de usuario caldera laboratorio	63

INTRODUCCIÓN

En la actualidad se puede encontrar un gran número de calderas operando en diversas aplicaciones de la industria, la mayoría de ellas cuenta con una instrumentación análoga que permite tener medidas aproximadas de las variables que se encuentran involucradas en los procesos, sin embargo con el paso del tiempo y por falta de actualización en los dispositivos de medida, ellos van perdiendo precisión por lo que es necesario realizar una calibración de estos instrumentos de medición análogos en determinados periodos de tiempo, teniendo en cuenta que en algunos dispositivos de medición es muy difícil realizarle una calibración como por ejemplo un sensor de temperatura análogo, por lo cual se hace necesario un cambio de la pieza.

La no actualización de los instrumentos de medición con el paso del tiempo y por falta de un mantenimiento preventivo oportuno, pueden afectar la seguridad de los procesos y de las zonas que rodean a la caldera, generando ambientes peligrosos para las personas y para la infraestructura de una empresa.

La instrumentación de la caldera debe ser el primer requisito para lograr una aceptable seguridad. Es bien sabido que en este tipo de proceso industrial se manejan variables como temperatura, presión y nivel del agua, que al no estar en un constante seguimiento puede generar un gran peligro en cuanto a la integridad física de los operarios como a la instalación donde se encuentra.

La contemplación de los elementos de medición adecuados en un diseño permite minimizar al máximo posibles riesgos que son naturales del mismo desarrollo del proceso. A partir de lo mencionado se debe tener un buen conocimiento sobre cada una de las variables, lo cual conlleva a saber cuáles son los puntos críticos de cada variable en el proceso y como son los cambios que esta presenta, para poder determinar el elemento supervisor que cumpla con las necesidades antes planteadas y además ayude al correcto funcionamiento.

El objetivo de este proyecto es el diseño para para la instrumentación y control de una variable, que permita automatizar el proceso, que tendrá como alcances la caracterización de la caldera conociendo cada uno de sus componentes, el diseño y selección de nuevos instrumentos de medida que permitan ser acondicionados a una plataforma Arduino para su posterior tratamiento, y el diseño de una identificación de la planta como también el controlador adecuado para esta, donde

se mejorara los tiempos de respuesta de la caldera y su eficiencia, como resultado adicional el mejoramiento de la seguridad en el área de trabajo, con medidas más seguras que pueden ser visualizadas en una interfaz de usuario que contara con alarmas que se activaran en caso de que alguna medida supere su límite de seguridad.

Inicialmente se consultó en el laboratorio la información que se tenía de la caldera para comenzar su caracterización, pero nos encontramos que la información no era suficiente para la caracterización que se quería lograr, con lo que se tomó la decisión de consultar directamente con el fabricante el cual brindo toda la información posible respecto a la construcción de la caldera, ya realizada la caracterización de los componentes actuales, se realizó una búsqueda donde los criterios de selección de los sensores era que fueran confiables y precisos en la medición como también que incluyera una salida de 0 a 5V para ser tomada como insumo, en la realización del diseño de la identificación y el control de la caldera, como último se diseñó una interfaz donde se visualizaran las señales de cada sensor de una forma práctica y sencilla, permitiendo ser interpretadas con facilidad por el operario de la caldera.

1. CALDERAS

1.1 HISTORIA Y GENERALIDADES

El origen de las calderas no tiene un principio claro. Desde hace muchos siglos atrás, el hombre ha intentado utilizar la fuerza del vapor para cumplir con diferentes tareas, el primer indicio que se tiene sobre la utilización de esta herramienta data del siglo I con la invención de Herón de Alejandría un griego matemático e ingeniero, cuya invención fue Eolipila una máquina constituida por una cámara de aire (generalmente una esfera o un cilindro), con tubos curvos por donde es expulsado el vapor. La fuerza resultante por esta expulsión hace que el mecanismo comience a girar, según la ley de acción-reacción. Normalmente, el agua es calentada en otra cámara, y unida a la anterior mediante tubos por donde pasa el vapor, aunque también puede ser calentada en la misma cámara desde donde se expulsa el vapor.

Hasta el fin del siglo XVIII solo se utilizaban calderas de baja presión que trabajaban con una capacidad de entre 200 a 300 gramos por centímetro cuadrado, con lo que conseguían desalojar el aire con el vapor, donde se lograba enfriar el vapor generando vacío en el momento de su condensación, procedimiento que se utilizaba en la fabricación de láminas de cobre y latón. Las primeras calderas de baja presión apenas lograban una eficiencia del 50%, además de que eran totalmente inseguras, causando una gran cantidad de víctimas mientras eran operadas.

Solo hasta principios del siglo XIX se encuentran antecedentes de las calderas modernas, debido a la invención de Papín el cual creó una pequeña caldera llamada marmita, que permitía mover la primera máquina homónima, que trabajaba por periodos cortos de tiempo ya que utilizaba vapor húmedo que al calentarse dejaba de producir trabajo útil.

Con el paso del tiempo las calderas han tenido mayor eficiencia, sin embargo en 1866 un informe realizado en Gran Bretaña de las explosiones de calderas registradas hasta la fecha, concluían que habían ocurrido unas 1046 explosiones, con un saldo de 4076 personas muertas y 2903 personas heridas. Por consiguiente en Europa como en Estados Unidos, se fueron formando asociaciones que por primera vez se concientizaron del problema, estas asociaciones conformadas por fabricantes, ingenieros y aseguradoras fueron

formulando normas de seguridad para el diseño, construcción y operación de las calderas en Estados Unidos en 1880 fue fundada la Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos (ASME), y fueron ellos los que crearon el Código para calderas y recipientes de presión, como medida inicial para mejorar los factores de riesgo que se presentaban en la época, lo que conllevó a que en 1914 se presentara el Reglamento para la construcción de calderas estacionarias y su presión permitida de trabajo, y en 1916 la creación de Sociedad Americana para Uniformizar Leyes para Calderas. En la actualidad la norma americana se rige por el Código para Calderas y Recipientes a presión de la Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos.

Asimismo para hacer cumplir la norma se organizó en 1919, la Junta Nacional de Inspectores de Calderas y Recipientes a Presión.

Además de los componentes mecánicos, la construcción y operación de la caldera, se debe tener en cuenta un elemento asociado a la eficiencia de la caldera, calidad del vapor y la seguridad, este elemento es el agua que permite la operación de la caldera por medio de procesos termodinámicos, al convertir el líquido en vapor, elemento que también es importante para el proceso de enfriamiento de las superficies del metal sometidas a la transferencia del calor, por consiguiente se puede decir que la circulación interna del agua, es una condición importante que se debe tener muy presente y ser respetada.

Hasta la actualidad se puede decir que las calderas son dispositivos que aún no se han terminado de inventar, en cuanto a que existen sin número de variedad de calderas, que cambian en su construcción y en algunos aspectos de operación, entre las más comunes que se pueden encontrar son las calderas de tipo pirotubular y acuotubular, aunque a lo largo de la historia este tipo de caldera han mejorado en eficiencia y seguridad no han dejado de ser un riesgo, por lo tanto en muchos países se regula los procedimientos, responsabilidades, de los constructores y propietarios de calderas por medio de legislación, es importante que ha estos dispositivos se les realice un mantenimiento preventivo periódico y sean inspeccionadas por una entidad competente.

1.2 TIPOS DE CALDERAS

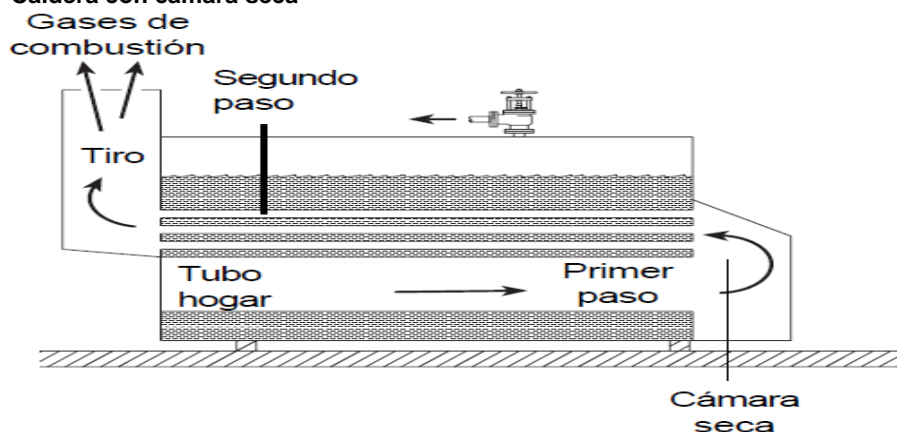
Aunque existe una gran variedad de calderas dependiendo de muchos criterios, pero generalmente en la industria se encuentran dos tipos de caldera: las pirotubulares y las acuotubulares, estas últimas se puede dividir en calderas de paso único o calderas con calderín agua – vapor. Adicionalmente se pueden clasificar de vapor saturado o sobrecalentado, de alta y baja presión.

1.2.1 CALDERAS PIROTUBULARES

El funcionamiento básico de una caldera pirotubular es realizado por medio de una transferencia de calor, transferencia que se realiza cuando pasa el calor a través de los tubos de la caldera, los cuales se encuentran rodeados de agua. Existen varias distribuciones de tubos para las calderas pirotubulares dependiendo del número de pases que se realicen desde el tubo hogar hasta el momento donde se expulsan los gases de combustión.

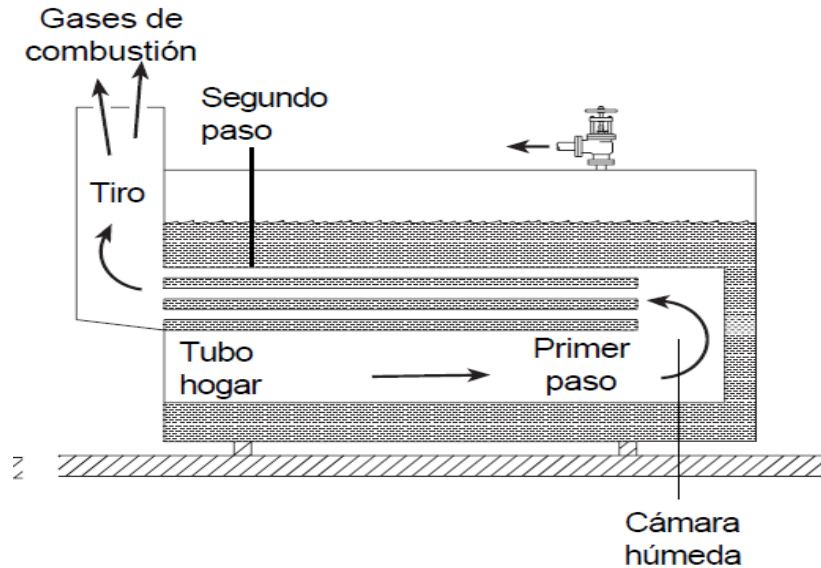
Generalmente se encuentran dos configuraciones de una caldera pirotubular, la primera (ver ilustración 1) es una caldera con cámara seca donde se invierte el flujo de calor en una cámara refractaria en la parte externa de la caldera, la segunda configuración es un método más eficaz de invertir el flujo de calor, por medio de una cámara húmeda (ver ilustración 2), con esta configuración la cámara se encuentra totalmente dentro de la caldera, permitiendo una mayor área de transferencia de calor, adicionalmente proporciona un mejor aprovechamiento de la transferencia de calor ya que las paredes de la cámara será donde el calor del hogar se encuentra más alto.

Ilustración 1 Caldera con cámara seca



Fuente: Tomado de Spirax Sarco [1]

Ilustración 2 Caldera con cámara húmeda



Fuente: Tomado de Spirax Sarco [1]

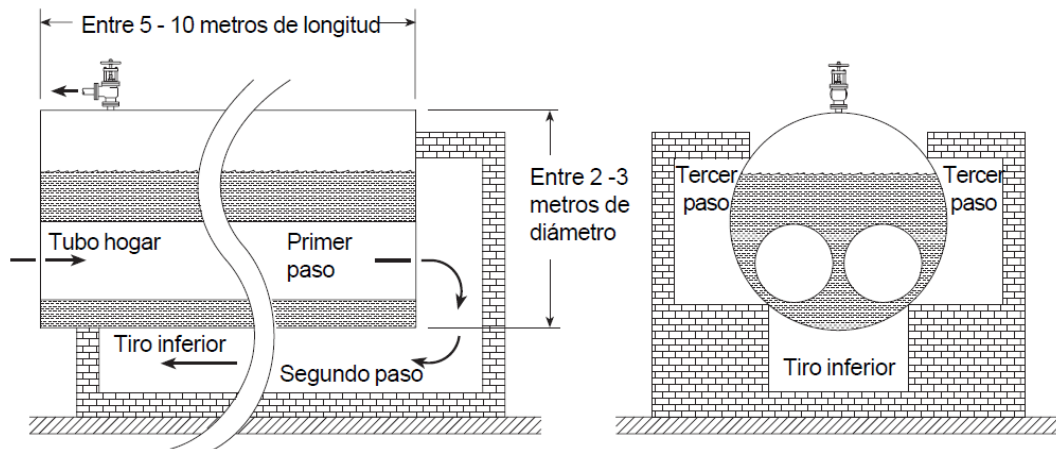
En las calderas pirotubulares es importante conocer que los gases de combustión deben tener una temperatura mínima de 420°C para calderas de acero normal y 470°C para calderas de aleación de acero antes de llegar a la cámara de inversión, debido a que temperaturas superiores pueden causar sobrecalentamiento y grietas en las planchas en el extremo del hogar.

Con el paso del tiempo y las demandas de la industria se han desarrollado varios tipos de calderas pirotubulares, de las cuales las de mayor importancia son:

• Caldera Lancashire

La caldera de Lancashire se desarrolló en 1844 por William Fairbairn, con el transcurso del tiempo este tipo de calderas se han dejado de utilizar, incluso se cree que en la actualidad son pocas las que existen, generalmente este tipo de caldera (ver ilustración 3) consistía de un cuerpo de acero de gran diámetro y de 5 a 10m de longitud, por donde pasaban dos tubos de con una parte corrugada para soportar la expansión en el momento de calentarse la caldera, los gases de combustión calentaban la superficie de los tubos permitiendo un proceso de transferencia de calor al agua que los rodeaba.

Ilustración 3 Caldera de Lancashire



Fuente: Tomado de Spirax Sarco [1]

Para mejorar la eficacia térmica de la caldera se fijaba a una estructura de ladrillos, por donde transitaban los gases calientes, con la temperatura algo reducida, el trayecto por la estructura enladrillada comenzaba en el momento que los gases abandonaban los tubos hogar, partían de la parte trasera de la caldera, transfiriendo el calor a través del fondo del cuerpo de la caldera, luego el flujo se desviaba en dos trayectos dirigidos a las partes laterales de la caldera, para finalmente pasar a la chimenea, procurando sacar la máxima cantidad de energía de los gases antes de ser expulsados a la atmosfera, con lo que se utilizaba un economizador en la chimenea permitiendo calentar el agua de alimentación.

La producción promedio para una caldera Lancashire de mayor tamaño era de aproximadamente 6500 Kg de vapor/h, para las más pequeñas entre 1500 – 2000 Kg de vapor/h, aunque la capacidad de evaporación varía dependiendo de su diseño, tipo de combustible, calidad de combustible y del hogar, este tipo de caldera podía trabajar a una presión de 17 bar aproximadamente, también podía afrontar demandas repentinas de vapor con facilidad gracias a que contenía un gran volumen de agua y abundante energía retenida, el volumen de agua permitía que el control y la calidad del agua no fueran puntos críticos como sucede en las calderas modernas, pero este tipo de calderas presentaban serias desventajas, llegando al punto de alterar la estructura de ladrillos y los tubos, cuando la caldera era calentada y enfriada repetidamente.

• Caldera Económica

Una caldera económica es una mejora de una caldera Lancashire, la cual tiene un menor tamaño equivalente a la mitad de una Lancashire y una mayor eficiencia térmica, la construcción de la caldera es similar a una Lancashire, con un cuerpo exterior cilíndrico y dos tubos hogar de gran diámetro, pero a diferencia de una Lancashire los gases de combustión no pasan a cámaras exteriores, si no que continúan su trayecto después de abandonar los tubos hogar por una serie de tubos de pequeño diámetro ubicados por encima de los tubos hogar, estos tubos aumentan la superficie de calentamiento del agua mejorando de esta forma la eficiencia, consecutivamente los gases de combustión pasan a la chimenea que cuenta con un ventilador el cual induce el tiro.

Puede encontrarse variaciones como el número de pases de la caldera y la utilización de una cámara húmeda, la configuración más usual de este tipo de calderas consta de tres pases una macara húmeda, el tamaño promedio está comprendido entre los 3m de longitud y 1,7m de diámetro hasta unos 7m de longitud y 4m de diámetro, la evaporación está comprendida entre unos 1000 kg/h de vapor hasta unos 15000 kg/h de vapor, la transferencia de calor de una caldera económica con la configuración más usual puede verse en la tabla 1.

Tabla 1 Datos transferencia de calor caldera económica

Transferencia de calor en una caldera de cámara húmeda de tres pasos			
	Area de tubos	Temperatura	Proporción del total de transferencia de calor
1 ^{er} paso	11 m ²	1600 °C	65 %
2 ^{do} paso	43 m ²	400 °C	25 %
3 ^{er} paso	46 m ²	350 °C	10 %

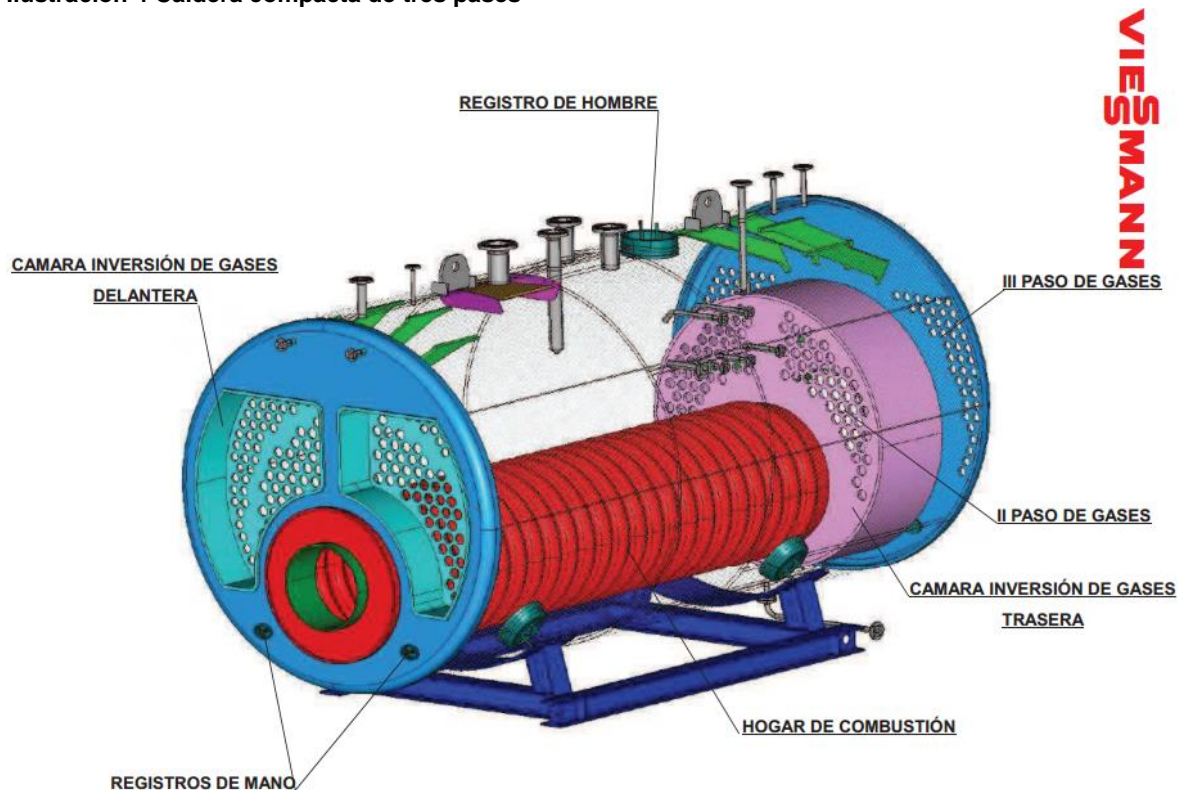
Fuente: Tomado de Spirax Sarco [1]

• Caldera Compacta

La caldera compacta moderna se puede considerar el último proceso evolutivo que han sufrido las calderas desde su inicio, todo esto gracias a la mejora de los materiales y los procesos industriales con lo que se ha permitido mayor utilización de tubos dentro de un espacio más reducido, mejorando la transferencia de calor.

La caldera compacta toma su nombre porque para su instalación solo se necesita conectar las tuberías de vapor, agua y purga de fondo, suministro de combustible y sus conexiones eléctricas, estas calderas se clasifican por el número de pases (ver ilustración 4), la cámara de combustión u hogar se considera el primer pase, las calderas más comunes son de tres pases.

Ilustración 4 Caldera compacta de tres pases



Fuente: Tomado de Viessmann [2]

1.2.2 CALDERAS ACUOTUBULARES

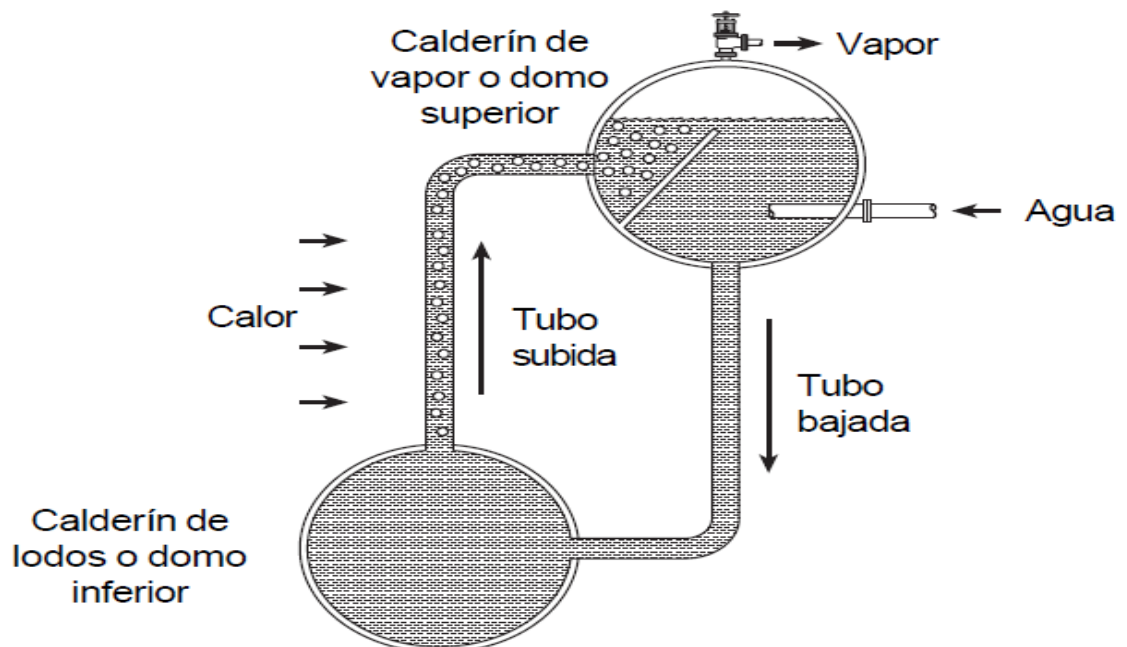
La diferencia entre una caldera acuotubular y una pirotubular es básicamente que en este caso el agua circula por los tubos y la fuente de calor a sus alrededores, partiendo de esto una caldera acuotubular puede usarse para presiones más altas porque el diámetro del tubo es significativamente más pequeño que el cuerpo de una caldera pirotubular, por consiguiente tiene una tensión superficial menor.

Una caldera acuotubular es usada cuando se necesita altos rendimientos en la producción de vapor, presiones altas o generar vapor recalentado, pero para la

mayoría de las aplicaciones industriales y comerciales es más apropiada una caldera piro-tubular, es necesario utilizar una caldera acuotubular cuando se requiere un rendimiento individual superior a 2700 kg/h, presiones superiores a 27 bar o temperaturas superiores a 340°C, sin embargo las calderas acuotubulares compiten con las piro-tubulares, gracias a la diversidad de estas calderas con unidades que varían entre 2000 kg/h hasta 3500000 kg/h e incluso superiores que pueden impulsar centrales eléctricas.

Las calderas acuotubulares funcionan con el principio de circulación del agua (ver ilustración 5), donde al agua de alimentación se introduce en el calderín de vapor que se encuentra a una altura superior al calderín de lodos, por consiguiente debido a una diferencia en la densidad del agua esta desciende por un tubo, donde el agua caliente tiene una densidad inferior, a medida que el agua se va calentando se van formando burbujas de vapor, el agua caliente y las burbujas de vapor ascienden hasta el calderín de vapor donde el vapor se separa del agua, aunque se debe considerar que al aumentar la presión se reduce la diferencia entre la densidad del agua y el vapor saturado, a consecuencia de esto hay menos circulación y se reduce el nivel de rendimiento, para corregir este inconveniente es necesario aumentar la distancia entre el calderín de lodo y el calderín de vapor.

Ilustración 5 Funcionamiento caldera acuotubular



Fuente: Tomado de Spirax Sarco [1]

En cuanto a calderas acuatubulares es usual encontrar tres tipos de calderas tales como una caldera con calderín cruzado, una caldera con calderín longitudinal o una caldera con tubos curvados, el principio de funcionamiento es igual para todas, trabajando con el principio de la temperatura y densidad del agua, entre ellas solo existen variación en la forma de construcción, con lo que se permite mejorar diferentes aspectos según la construcción, por ejemplo una caldera de tubos curvados permite una superficie grande para la transferencia de calor y estimula la circulación del agua, la caldera con calderín cruzado permite que se logre una temperatura uniforme en el calderín y la utilización de un mayor número de tubos, mientras la caldera con calderín longitudinal solo es una variable de la caldera con calderín cruzado, diferenciándose de la posición en que se pone el calderín de la fuente de calor.

1.3 IDENTIFICACION CALDERA DEL LABORATORIO

La caldera con la cual se desarrolla este proyecto (ver ilustración 6) pertenece al laboratorio de mecatrónica, del programa de Ingeniería Mecatrónica por ciclos propedéuticos de la Universidad Tecnológica de Pereira, en la que se encontró la utilización de sensores para la medición de determinadas variables como el nivel, la temperatura y la presión, tipo análogos con lo cual se determina el diseño para la modernización de la instrumentación pasando de una instrumentación análoga a una instrumentación digital, que permita aumentar los factores de seguridad en el ambiente en el cual se encuentra, ya que la nueva instrumentación permitirá medidas más confiables y exactas, igualmente se diseña un control de presión adaptativo mejorando la eficiencia y previniendo la posibilidad de que se presenten accidentes por sobrecargar en la caldera.

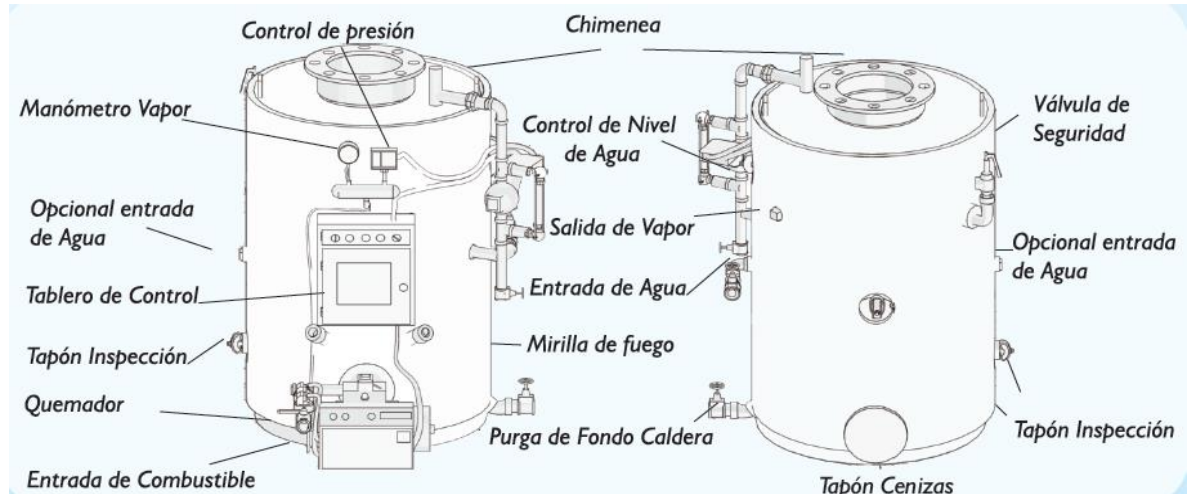
Ilustración 6 Caldera laboratorio de Mecatrónica



Fuente: Autor

Esta caldera cuenta con los siguientes componentes (ver ilustración 7), y las siguientes características (ver tabla 2).

Ilustración 7 Partes Caldera



Fuente: Tomado de Tecnik Ltda. [3]

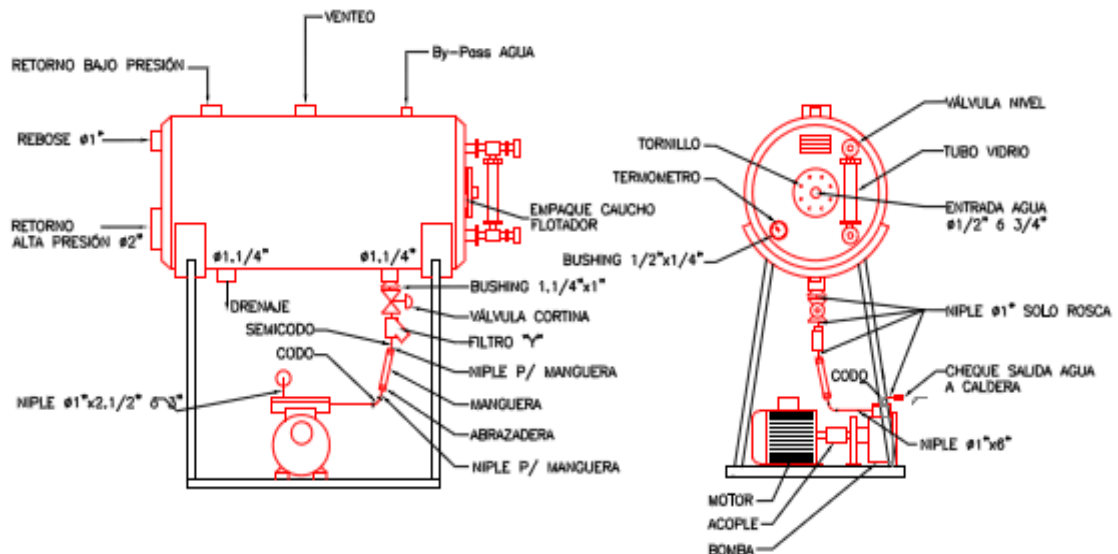
Tabla 2 Características caldera laboratorio Mecatrónica

CALDERA AUTOMATICA VAPOR VERTICAL	
SERIE	OP-12-059
REFERENCIA	D72L150
CAPACIDAD	6 B.H.P. - 200.000 BTU/ hora
PRESION DE TRABAJO	0 a 125 psi.
PRESION DE DISEÑO	150 psi.
COMBUSTIBLE	ACPM
CONSUMO ACPM	1.8 galones/ hora
PRODUCCION DE VAPOR	207 libras / hora a 212° F
QUEMADOR DE COMBUSTION	Tiro forzado según Norma UL & FM
TIPO	Pirotubular, vertical con camisa humeda, 1 paso
SUPERFICIE DE TRANSFERENCIA	30.6 Ft ²
PESO NETO	450 Kilos
DIMENSIONES	72 cms diam. X 150 cms altura
SISTEMA ELECTRICO	110 - 220 Voltios
MANEJO	Operación Automatica
CONTROLES DE SEGURIDAD	Proteccion alto - bajo nivel agua - Proteccion control max. Presion vapor - Proteccion control seguridad llama
NORMAS DE FABRICACION	Según ICONTEC y ASME

Fuente: Autor

Adicionalmente cuenta con un tanque para el almacenamiento del agua (ver ilustración 8), con capacidad para 30 galones y una presión de 0 – 3 psi, que también cuenta con un medidor de nivel análogo.

Ilustración 8 Tanque almacenamiento de agua

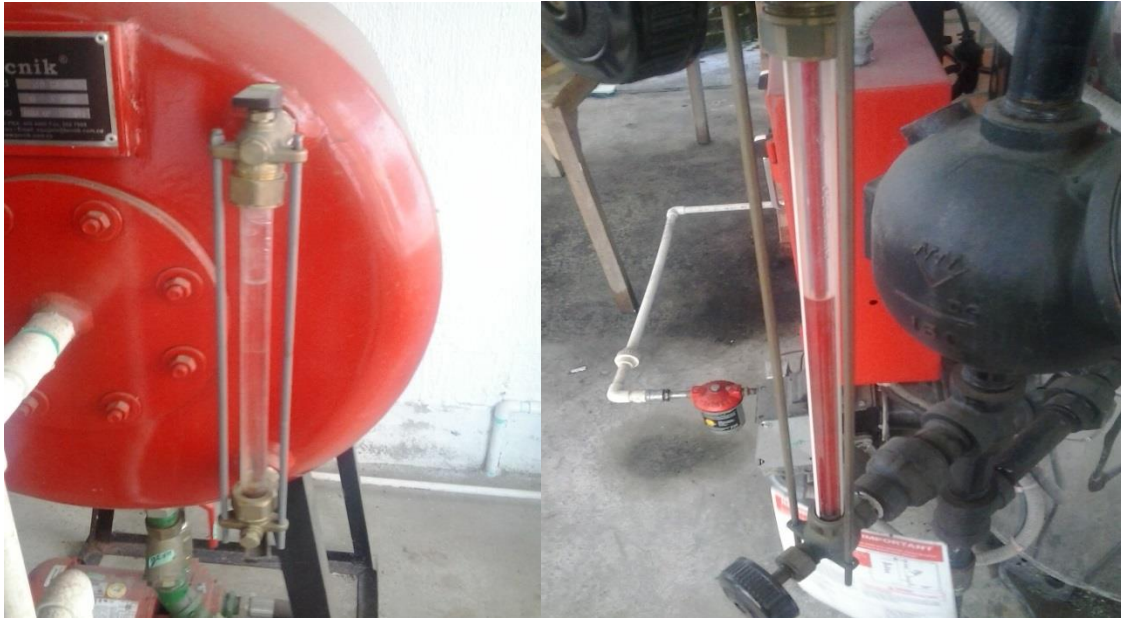


Fuente: Tomado de Tecnik Ltda. [3]

Como se puede observar es una caldera con características sencillas y componentes básicos, que con el estudio necesario de algunos componentes se puede mejorar, de esta manera obtener un mejor aprovechamiento de la caldera aumentando su eficiencia y las características de seguridad, previniendo accidentes con una manipulación más segura y son medidas más confiables.

Dentro de los instrumentos de medición de que se encuentran en esta caldera, se pueden observar tubos de vidrio para la medición de nivel (ver ilustración 9), que dan una medida aproximada y no muy confiable del nivel, manómetros para la medición de presión y temperatura (ver ilustración 10), los cuales aunque dan una medida más confiable no permiten realizar un tratamiento de la señal, pudiendo llevarlas a una interfaz o ser utilizadas como una variable de control, igualmente por motivos de seguridad la caldera cuenta con un control de presión (ver ilustración 11) tipo ON/OFF con solo una configuración inicial, y de necesitarse otros valores este debe de ser manipulado por un operario, con lo que se puede presentar un accidente por un factor humano en una mala manipulación del dispositivo.

Ilustración 9 Medidores de Nivel



Fuente: Autor

Ilustración 10 Manómetros de Presión y Temperatura



Fuente: Autor

Ilustración 11 Control de Presión



Fuente: Autor

Por los peligros que se pueden presentar al momento de manipular la caldera, en este documento se realizara únicamente el diseño para el mejoramiento en la instrumentación y el diseño de un control adaptativo de presión, permitiendo aumentar los factores de seguridad y mejorando la eficiencia de la caldera.

2. DISEÑO INSTRUMENTACIÓN DE LA CALDERA

La caldera como todo sistema mecánico se compone de diferentes elementos que ayudan a que esta cumpla las finalidades para la cual fue creada, estos elementos se comprenden en mecánicos, electromecánicos y electrónicos, cada uno proporcionando bondades al sistema para la mejora en aspectos como rendimiento, seguridad y calidad de los procesos realizados en dicho elemento.

La caldera del laboratorio de Mecatrónica se encuentra dotada de elementos electromecánicos y mecánicos (ver ilustración 12), que por las prestaciones que ofrecen hace que el sistema tenga un alto porcentaje de seguridad, pero con la oportunidad de mejorar los elementos, a un punto de minimizar todo riesgo posible el cual se puede lograr por el diseño de una instrumentación digital que nos permita tener control sobre cada una de las variables.

Ilustración 12 Caldera vertical pirotubular del laboratorio de Mecatrónica.



Fuente: Autor

Para hacer una mejor finalización de este proyecto de investigación se desea identificar cada uno de los mecanismos presentes en la caldera, reconocer su funcionamiento, sus protecciones ante fallas del sistema y la parametrización que tienen ante diferentes estados del proceso. Lo anterior con la intención de preestablecer condiciones de operación en los elementos electrónicos a usar en el diseño de la instrumentación.

2.1 CARACTERIZACIÓN COMPONENTES ACTUALES DE LA CALDERA

A continuación se dan a conocer detalladamente cada uno de los mecanismos, tanto de control, supervisión y seguridad.

- **Quemador:**

Este dentro del sistema de la caldera cumple con la función de regular la quema de aire y combustible, los cuales ayuden a tener una presión en el vapor constante y eficiente. Además cuenta con un sensor (foto celda) encargado de supervisar la llama en todo momento que se requiera para garantizar que no haya ninguna variación en las variables de vital importancia para un buen proceso (ver ilustración 13). El garantizar que los rangos de operación de la foto celda sean los adecuados servirá en el objetivo final de la caldera el cual se ve evaluado por la eficiencia y la capacidad de mantener constante la presión (ver tabla 3).

Ilustración 13 Quemador Beckett "SF" oil buener.



Fuente: Autor

Las características del quemador son:

Tabla 3 Características quemador “SF” oíl buener.

Quemador.	
Marca	Beckett.
Modelo	SF.
Serie	Oíl burner.
Rango de proporción al encender	1,25 a 5,50 gph.
Potencia del motor	¼ HP.
Capacidad bomba de combustible	7 gph (normal).
Válvula de solenoide de aceite bloquea a	3 gph.
Mando primario para cierre de puerta	15 segundos (Máximo).
Entrada	175000 a 770000 Btu/Hr.
Operación de carga	7,1 Amperios.
Foto celda.	
Marca	Honeywell
Modelo	C554A.
Voltaje	60 V.
Temperatura ambiente	60 °C.

Fuente: Autor

La foto celda es un disco cerámico con cubierta de sulfuro de cadmio y tiene una rejilla conductora superpuesta. La rejilla en su totalidad es hermética con el objetivo de reducir las posibilidades de deterioro de los electrodos. Cuando la resistencia es baja en el disco cerámico se interpreta en el proceso como una necesidad de apagar el quemador, para reducir consumos de energía y evitar un sobrecalentamiento en la caldera.

- **Controlador de presión:**

Este elemento mediante un sistema electromecánico cumple con la función de garantizar en un rango determinado de la variable, además ayuda a conservar las características básicas que exige el sistema en cuanto al valor máximo y el valor de trabajo que tiene la variable.

Para que el funcionamiento de este elemento sea correcto se debe tener certeza desde la conexión por primera vez hasta la puesta en marcha con su máximo estado de trabajo. Los puntos a tener en cuenta con el controlador de presión son:

-Observar el funcionamiento del visor de cambio de la variable, para que a medida que se modifican los set-point, los valores de la presión de igual manera se modifiquen (ver figura 14).

-Verificar las anchuras y los puntos de estabilización del controlador, para determinar la precisión que se está teniendo y de ser necesario calibrar de nuevo para lograr la precisión necesaria.

-Si la presión de aceite baja, el control debe localizarse por encima del nivel determinado en la válvula de seguridad.

-Si hay una disminución en el flujo de vapor, la presión del aceite debe estar por debajo del nivel determinado a una presión de cero, el quemador debe estar apagado y la válvula de seguridad cerrada.

Ilustración 14 Controlador de presión Honeywell L404F1102.



Fuente: Autor

Las características del control de presión son:

Tabla 4 Controlador de presión Honeywell L404F1102.

Control de presión.	
Marca	Honeywell.
Modelo	L404F1102.
Presión máxima	300 psi.
Presión de trabajo	10 a 150 psi.
Rango	10 a 300 psi.
Conexión	¼ NPT hembra.
Tipo de control	Proporcional.
Modulante	140 Ohm.

Fuente: Autor

- **Control de nivel de agua en la caldera:**

Es de vital importancia ya que es muy sensible a cualquier cambio que se dé en el sistema, representado en la demanda de más vapor (ver ilustración 15). Con este control se define los límites inferiores y superiores para las cantidades de agua en el tanque de almacenamiento (ver tabla 5), además se implementa para hacer que la cantidad de vapor sea la necesaria y las partes de la caldera que se ven expuestas al calentamiento se sobrecalienten provocando una explosión, otro aspecto que se maneja es la cantidad de agua que se encuentra dentro del tanque de la caldera para que no sea en exceso y provoque pérdida de energía.

Ilustración 15 Control de nivel McDonnell & Miller de agua en la caldera.



Fuente: Autor

Tabla 5 Control de nivel McDonnell & Miller de agua en la caldera.

Control nivel de agua.	
Marca	McDonnell & Miller.
Modelo	150S.
Presión máxima	150 psi.
Presión de trabajo máxima	50 psi.

Fuente: Autor

- **Motobomba tanque suministrador de agua:**

La función de esta motobomba (ver ilustración 16) es suministrar agua desde el tanque de almacenamiento al tanque interno de la caldera para garantizar que el volumen del vapor sea constante.

Ilustración 16 Motobomba tanque suministrador de agua IHM turbina TB-150.



Fuente: Autor

Las características de la motobomba son:

Tabla 6 Motobomba tanque suministrador de agua.

Motobomba tanque de agua.	
Marca	Weg.
Modelo	IHM turbina TB-150.
Conexión de descarga	1" NPT.
Presión de trabajo	20 a 135 m.
Caudal	1,5 a 6 gpm.

Fuente: Autor

- **Tanque de suministro de agua:**

El tanque encargado de suministrar agua a la caldera para la compensación de pérdidas de agua y vapor, actualmente no tiene ningún tipo de control que ayude a que el reservorio en todo momento tenga la cantidad de agua necesaria, el único mecanismo que se tiene es una mirilla el cual muestra a escala el nivel actual dentro del reservorio y además depende de una constante observación por parte del operario a cargo del funcionamiento del sistema (ver ilustración 17). El tanque está conectado a una entrada constante de agua para mantener el líquido en todo momento y por medio de una motobomba saca agua de sí mismo para ayudar a complementar el proceso en la caldera. Los rangos de operación están determinados a la demanda que presenta la caldera (ver tabla 7).

Ilustración 17 Tanque de suministro de agua.



Fuente: Autor

Tabla 7 Tanque de suministro de agua.

Tanque suministro de agua.	
Capacidad	30 galones.
Presión	0 a 3 psi

Fuente: Autor

- **Válvula de seguridad:**

La función de este elemento es proporcionar seguridad al sistema de la caldera cuando se den sobrepresiones en ella, además debe permitir la normalización del sistema cuando se hacen paradas en él. El parámetro límite de la válvula de seguridad debe estar definido de antemano, este no debe sobrepasar el máximo de la máquina y tampoco debe estar ligeramente por debajo del mismo, ya que se esforzaría al máximo la máquina poniendo en gran riesgo la integridad de la misma o de quienes la operan.

La válvula de la caldera es de gran capacidad, con asiento metálico y una guarnición con baño de acero (ver ilustración 18), para el mejoramiento de las propiedades y así poder brindar mayor seguridad en el funcionamiento del sistema.

Ilustración 18 Válvula de seguridad



Fuente: Autor

- **Termómetro:**

El termómetro que está instalado en la caldera se encuentra ubicado en el tanque de alimentación de agua para la caldera, este es análogo tipo convencional el cual consta de un visor de variación con escala en grados centígrados.

- **Manómetro:**

En el sistema se encuentran dos de estos elementos, uno de ellos está a la entrada del quemador y el otro es el apoyo de trabajo para el control de presión, son elementos análogos y de igual manera que los termómetros tienen un visor de variación con escala en sistema internacional y sistema inglés.

2.2 CARACTERIZACIÓN COMPONENTES PARA EL DISEÑO

La instrumentación digital deseada en el diseño de este trabajo se realiza con la finalidad de establecer parámetros de seguridad de un alto nivel, permitiendo tener certeza a los operarios sobre el estado de las variables y posibles fallas que pueda presentar el sistema. Además aprovechando las ventajas que proporcionan los elementos electrónicos se decide realizar una interfaz en el programa LabView para demostrar el comportamiento del sistema en diferentes puntos de operación.

Para cumplir con el objetivo principal se decide diseñar el uso de sensores electrónicos por diferencial de tensión, los cuales dadas sus características se puedan diseñar junto al uso de la plataforma Arduino. El uso de la plataforma Arduino se da con la necesidad de garantizar una respuesta ligera y muy exacta de los valores manejados en el sistema, ya que es de suma importancia ver los cambios en tiempo real y poder hacer modificaciones de igual manera. Para lo cual se cuenta en esta plataforma con una frecuencia de respuesta alta en comparación a otros micros controladores que se asemejen a las características de este.

- **Plataforma Arduino:**

La necesidad de cumplir con el nombre planteado de instrumentación digital y control de la variable de presión en la caldera del laboratorio de Mecatrónica, lleva a que otro objetivo de la investigación desarrolle un programa para la plataforma Arduino (ver ilustración 19), con la cual se puedan establecer condiciones que

permitan que las reglas iniciales para obtener una presión idónea se cumplan. Las actividades a desarrollar con la plataforma son de carácter condicional, comprendidas en la elaboración de un código que permita accionar cada uno de los elementos que integran el proceso.

Ilustración 19 Plataforma Arduino



Fuente: Tomado de Arduino [4]

Gracias a las bondades que brinda la plataforma Arduino se hace la activación de la válvula alimentadora de agua del tanque reservorio al tanque de la caldera, la apertura o cierre de la válvula alimentadora de combustible, el control de la presión dentro de la caldera y por último se diseña una interfaz donde se muestra gráficamente el estado del proceso. Lo anterior se logra mediante el diseño de un programa en el software que provee el vendedor de la plataforma. El programa se debe hacer en programación C, lo cual ayude a la apertura de puertos para activación o cierre de los mismos. Las especificaciones de operación de la plataforma Arduino están detalladas en la tabla 8.

Tabla 8 Características Arduino Uno

Características Arduino Uno.	
Micro controlador	Atmega328
Voltaje operación	5V/3.3V
Corriente DC por Pin I / O	40mA

Velocidad de respuesta	16 MHz
Pines entradas análogas	6 pines
Pines I/O digital	14 (6 con PWM)
SRAM	2 KB (ATmega328)
EEPROM	1 KB (ATmega328)
Memoria Flash	32 KB (ATmega328) de los cuales 0,5 KB utilizado por gestor de arranque

Fuente: Autor

- **Sensor electrónico de presión:**

El sensor encargado de supervisar los cambios en la variable de presión (ver ilustración 20), cumplirá en este caso del proyecto de investigación el papel más importante de todos los sensores que están dispuestos en el diseño, ya que será donde se centraran los objetivos, el controlar la presión.

Las características de este sensor (ver tabla 9) deben estar acorde a los demás elementos que se eligieron para la obtención de una instrumentación adecuada y a su vez lograr el control de la variable de presión, el sensor debe ser capaz de:

- Mostrar la variación en un tiempo de respuesta muy rápido, dada la importancia de la variable.
- Poder mostrar en una pantalla el valor actual de la variable para que el operario tenga una muy clara perspectiva de lo que sucede en el sistema.
- Poseer una salida analógica de 5V para adaptarlo al micro controlador Arduino para el respectivo control.
- Tener una histéresis muy baja para garantizar el set-point que se le ponga al controlador.

Ilustración 20 Sensor de presión



Fuente: Tomado de OMEGA. [5]

Tabla 9 Características sensor se presión

Transductor de presión DPGM409-010BDWU.	
Marca	SUNX.
Modelo	DP111AEPJ.
Alimentación	Baterías.
Histéresis	0.08% BSL.
Presión máxima	500 PSI
Salida analógica	0 a 5 Vdc.
Precisión de salida analógica	0.08% típica
Rango de muestra	0,38 a 30 segundos
Temperatura de operación	-18 a 66 °C

Fuente: Autor

- **Sensor electrónico de temperatura:**

La función del sensor de temperatura (ver ilustración 21) en el diseño de la instrumentación es supervisar y mostrar los cambios presentes en la variable para el cual es requerido, las características de este deben ser muy específicas para garantizar que el proceso se cumpla de una buena manera y para garantizar que no se den sobrecalentamientos en el sistema que puede provocar fallas irreversibles. A demás deben estar acorde de igual manera que el sensor de presión a los demás elementos de la instrumentación y control.

Las características que debe poseer el sensor a usar son:

- Ser de un material resistente a la corrosión, dadas las altas concentraciones de humedad que se dan en un sistema térmico como la caldera.
- Tener un rango de operación amplio, para determinar cualquier cambio brusco que se pueda presentar.
- Tener una salida analógica de 0 a 5 V, para tener conexión a la plataforma Arduino y así darse la instrumentación necesaria.
- Tener como mecanismo principal de operación el uso de un medio por infrarrojo, para tener mayor certeza en la medida obtenida.

Ilustración 21 Sensor de temperatura



Fuente: Tomado de SoloStocks. [6]

En la tabla 10 se muestra algunos de los datos de la ficha técnica del sensor de temperatura.

Tabla 10 Características sensor de temperatura

Sensor de temperatura.	
Marca	Texis.
Modelo	IRM12.
Alimentación	5 – 12 V.
Temperatura máxima	1000 °C.
Salida analógica	0 – 5 Vdc.
Rango de operación	-150 a 1000 °C

Fuente: Autor

- **Sensor de nivel:**

La función que debe tener este sensor (ver ilustración 22) a pesar que no se encuentre dentro del sistema de la caldera es fundamental en el proceso de la caldera, debido a que es el encargado de supervisar los niveles de agua en el tanque reservorio de agua para alimentación del tanque de la caldera. Si este sensor no entrega un dato correcto del nivel actual puede estar poniendo en peligro el sistema a un tal punto de una explosión.

Ilustración 22 Sensor de nivel



Fuente: Tomado de Sensovant. [7]

El sensor debe tener entre sus propiedades:

-Al mantener en constante contacto con el agua o la humedad que esta genera debe tener muy buena resistencia a la corrosión.

-Su principio de funcionamiento debe estar basado en un diferencial de presión, permitiendo obtener mejor respuesta al cambio en la variable.

-Tener un voltaje de salida de 0 a 5 V, dando lugar al complemento con el resto de la instrumentación diseñada.

En la tabla 11 se muestra algunos de los datos de la ficha técnica del sensor de nivel.

Tabla 11 Características sensor de nivel

Sensor de nivel.	
Marca	Gill.
Modelo	GSlevel.
Alimentación	24 Vdc.
Precisión	2%.
Rango de trabajo	-40 ~ 125 °C.
Salida analógica	0 ~ 5 Vdc.
Rango de operación	0 ~ 2 m.

Fuente: Autor

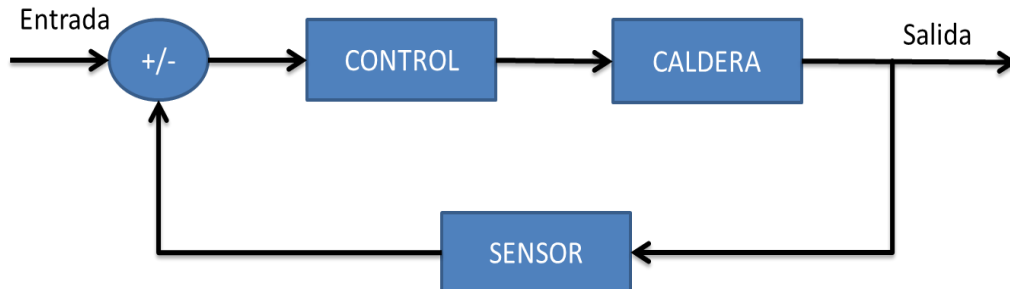
Para lograr un buen funcionamiento del proceso se hace necesario primero establecer una parametrización de cada una de las variables, esta se logra con una buena elección de los elementos destinados a supervisar. Se hace necesario complementar la instrumentación a diseñar con el controlador independiente del quemador, logrando crear una supervisión general de toda la máquina y así tener bajo condiciones normales toda la caldera.

La declaración de los límites de trabajo de cada uno de los sensores permitirá desarrollar un código de trabajo para el Arduino, el cual responderá a una serie de condiciones preestablecidas.

3. DISEÑO CONTROL DE PRESIÓN

El sistema de control de una caldera (ver ilustración 23) es una herramienta que permite conseguir equilibrios entre la masa y la energía dependiendo de las variaciones en la demanda del consumidor, regulando de esta manera la cantidad de masa y energía introducidas para conseguir unas condiciones de salida deseadas, donde el insumo principal del sistema de control son las señales de los instrumentos de medida, por consiguiente estas medidas deberán ser confiables y exactas.

Ilustración 23 Esquema de control



Fuente: Autor

Desde el punto de vista energético se debe tener una proporción entre la masa y la energía, permitiendo mantener un equilibrio en la presión de la caldera, para lo cual medir el nivel del agua es importante para mantener una proporción en la masa, y medir la temperatura para complementar una armonía entre la masa y la energía.

Considerando lo anterior se diseña un sistema de control adaptativo de tercer orden para aumentar la complejidad del controlador y así mismo obtener una mejor respuesta de salida, también se debe considerar la implementación de un filtrado en caso de presentarse ruidos o interferencias en las señales de salida de los instrumentos de medición.

El objetivo de realizar un controlador es permitir que haya un equilibrio entre la energía entregada y suministrada por el sistema, asegurando una producción de vapor con las condiciones de operación necesarias, evitando así alguna pérdida de energía y evitando un posible accidente, definiendo de esta manera que cuando los usuarios de la caldera demandan más vapor, el aumento del caudal

provoca una caída de presión, la magnitud de esta caída depende del volumen de agua, del de vapor y la magnitud del cambio en la demanda.

Se puede decir que existe una relación 1:1 entre el caudal de vapor y de energía solo cuando la temperatura y la presión no sufren cambios considerables, estableciendo así lo siguiente:

- $Demanda\ de\ vapor = Q_{vapor} - Error_{presion}$
- $Suministro = Combustible + Aire + H_2O + \Delta Energia_{Almacenada}$
- $Consumo = Demanda\ de\ vapor$
- $\Delta P = 0$ si $Consumo = Suministro$ $\Delta P = Diferencial\ de\ presion$
- $\Delta P = \uparrow$ si $Consumo < Suministro$
- $\Delta P = \downarrow$ si $Consumo > Suministro$

Normalmente la variable principal de control de una caldera es la presión, que es un indicador de buen funcionamiento y la eficiencia, además de ser un indicativo entre la masa y la energía, como realizar intervenciones en la caldera es considerado un peligro, el controlador se diseñara por medio de la simulación de un sistema aleatorio, y la identificación se realizara por medio de la matriz de Hankel, y consecutivamente se buscara la mejor técnica de control que se adapte al sistema simulado.

3.1 IDENTIFICACIÓN DEL SISTEMA POR MATRIZ DE HANKEL

Inicialmente antes de construir una matriz de Hankel para la identificación de un sistema se debe conocer la representación polinomial real a partir de la entrada y la salida en tiempo discreto, de esta manera se puede considerar una ecuación en diferencias de la forma:

$$y[k] + a_1y[k - 1] + a_2y[k - 2] + \dots + a_ny[k - n] = b_0u[k - 1] + b_1u[k - 2] + \dots + b_{n-1}u[k - n]$$

Donde despejando $y[k]$ se tiene

$$y[k] = -a_1y[k - 1] - a_2y[k - 2] - \dots - a_ny[k - n] + b_0u[k - 1] + b_1u[k - 2] + \dots + b_{n-1}u[k - n]$$

También se podría reescribir como

$$y[k] = \frac{[-a_1 \quad -a_2 \cdots -a_n \quad b_0 \quad b_1 \quad \cdots \quad b_{n-1}]}{\theta^T} \begin{bmatrix} y[k-1] \\ y[k-2] \\ \vdots \\ y[k-n] \\ u[k-1] \\ u[k-2] \\ \vdots \\ u[k-n] \end{bmatrix} \frac{1}{\varphi[k-1]}$$

Entonces θ es el vector de parámetros del sistema y φ es el vector de entradas y salidas anteriores, el sistema del orden sería n y la representación polinomial $y[k] = \theta^T \varphi[k-1]$

Aplicando la transformada Z a la ecuación en diferencias del sistema se tiene:

$$\begin{aligned} y(z) + a_1 z^{-1} y(z) + a_2 z^{-2} y(z) + \cdots + a_n z^{-n} y(z) \\ = b_0 z^{-1} u(z) + b_1 z^{-2} u(z) + \cdots + b_{n-1} z^{-n} u(z) \end{aligned}$$

Factorizando $y(z)$ y $u(z)$ se obtiene

$$(1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \cdots + a_n z^{-n}) y(z) = (b_0 z^{-1} + b_1 z^{-2} + \cdots + b_{n-1} z^{-n}) u(z)$$

Despejando $y(z)$

$$y(z) = \frac{b_0 z^{-1} + b_1 z^{-2} + \cdots + b_{n-1} z^{-n}}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \cdots + a_n z^{-n}}$$

Multiplicando por z^n se tiene

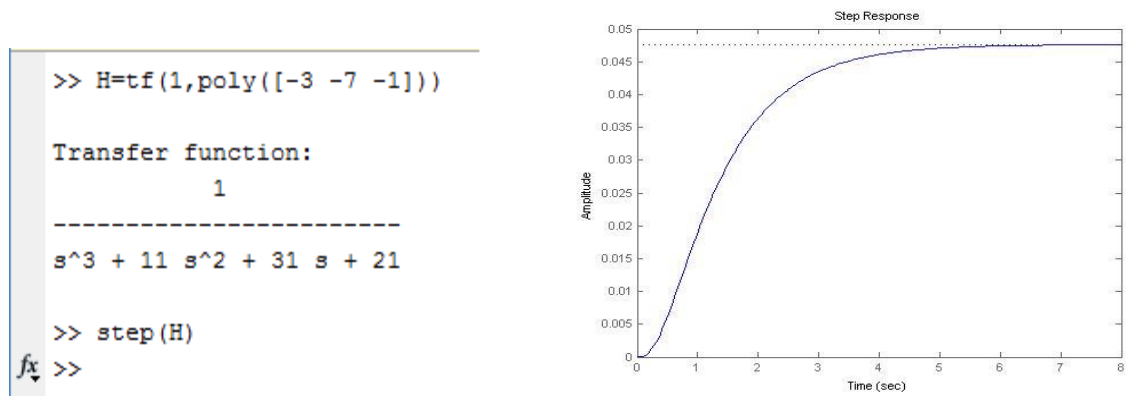
$$y(z) = \frac{b_0 z^{n-1} + b_1 z^{n-2} + \cdots + b_{n-1}}{1 + a_1 z^{n-1} + a_2 z^{n-2} + \cdots + a_n}$$

Con lo anterior tenemos la representación básica de un sistema en su función de transferencia en tiempo discreto con lo cual se procederá con el diseño de la etapa de identificación, por motivos de seguridad se realizara las pruebas simuladas por medio de software ya que la manipulación de la caldera puede presentar un peligro para las personas, si esta manipulación no se realiza correctamente, por

consiguiente se tomara un sistema aleatorio con tres polos por medio de Matlab, y utilizando sus funciones se transformara el sistema de tiempo continuo a tiempo discreto teniendo como resultado una función de transferencia discreta que nos permita realizar las simulaciones correspondientes.

Con la utilización de la función `tf` en Matlab se saca una función de transferencia en tiempo continuo con una entrada y una salida y dentro de la función anterior utilizamos la función `poly` para ingresar los polos que tendrá el sistema para este caso utilizaremos tres polos y todos estables, después de tener el resultado de la función de transferencia aplicamos sobre ella una función `step` (ver ilustración 24), la cual dará por resultado una gráfica donde obtendremos el tiempo de muestreo de la función para proseguir a transformarla a tiempo discreto.

Ilustración 24 Función de transferencia en tiempo continuo



Fuente: Autor

Teniendo la función grafica se obtiene un tiempo de muestreo, en ella se puede observar que la función tiene un tiempo de establecimiento de 8 segundos, las relaciones que se toman es entre 4 a 10 muestras de una constante de tiempo del sistema, la constante de tiempo para este sistema seria de 2 segundos la cual se calcula dividiendo el tiempo de establecimiento en 4, el tiempo de muestreo puede variar entre 200 milisegundos y 500 milisegundos, el tiempo de muestreo seleccionado para este sistema es de 200 milisegundos, este tiempo de muestro es importante ya que dependiendo del tiempo de muestreo que se seleccione la función de transferencia en tiempo discreto puede tener variaciones, para transformar la función a tiempo discreto se selecciona un modelo de discretización donde se requiere la planta en tiempo continuo y el tiempo de muestreo (ver ilustración 25), el resultado de esta operación nos da los valores que van en la

ecuación en diferencias, los valores del denominador corresponden a los valores de a y los valores del numerador corresponderían a los b .

Ilustración 25 Función de transferencia discreta

```
>> HD=c2d(H,0.2)

Transfer function:
0.0007908 z^2 + 0.00188 z + 0.0002638
-----
z^3 - 1.614 z^2 + 0.7866 z - 0.1108

Sampling time: 0.2
fx >>
```

Fuente: Autor

Para la etapa de identificación es importante conocer el orden del sistema y el retardo, conociendo así el número de coeficientes del numerador y del denominador, con lo cual se plantea el siguiente modelo representativo.

$$\sum_{j=0}^n q^{-j}y[k]a_j = q^{-d} \sum_{j=0}^m q^{-j}u[k]b_j$$

Dónde: $n = \text{Orden del sistema}$

$d = \text{Retardo}$

$m = n - d$

De tal manera que si se tiene un sistema de orden 3 y el retardo con valor de 1, entonces $m = 2$, y la ecuación en diferencias sería:

$$\begin{aligned} a_0y[k] + a_1y[k - 1] + a_2y[k - 2] + a_3y[k - 3] \\ = q^{-1}(b_0u[k] + b_1u[k - 1] + b_2u[k - 2]) \end{aligned}$$

Despejando $y[k]$ si $a_0 = 0$

$$y[k] = -a_1y[k - 1] - a_2y[k - 2] - 3y[k - 3] + b_0u[k - 1] + b_1u[k - 2] + b_2u[k - 3]$$

Con los datos anteriores podemos proceder a realizar la matriz de Hankel que nos permitirá encontrar los valores de θ a partir de los valores de φ , la matriz está compuesta por las entradas y las salidas del sistema donde la k-ésima fila será de la siguiente forma.

$$k\text{ésima fila} = [y[k-1] \quad y[k-2] \quad y[k-3] \quad u[k-1] \quad u[k-2] \quad u[k-3]]$$

Un dato importante en la construcción es el número de muestras que tendremos en la matriz, a medida que obtengamos más medidas el resultado será más acercado al valor de la función de transferencia de la planta real, por ejemplo si se tiene un número de 100 muestras la construcción sería de la siguiente manera.

$$\{y[k]\} = \{y[1], y[2], y[3], \dots, y[100]\}$$

$$\{u[k]\} = \{u[1], u[2], u[3], \dots, u[100]\}$$

$$H = \begin{bmatrix} y[3] & y[2] & y[1] & u[3] & u[2] & u[1] \\ y[4] & y[3] & y[2] & u[4] & u[3] & u[2] \\ y[5] & y[4] & y[3] & u[5] & u[4] & u[3] \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ y[k-1] & y[k-2] & y[k-3] & u[k-1] & u[k-2] & u[k-3] \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ y[99] & y[98] & y[97] & u[99] & u[98] & u[97] \end{bmatrix} b = \begin{bmatrix} y[4] \\ y[5] \\ y[6] \\ \vdots \\ y[k] \\ \vdots \\ y[100] \end{bmatrix}$$

$$b = H\theta$$

Donde b y H son conocidos por lo que se realiza la solución de la matriz por medio de mínimos cuadrados.

$$\|b - H\theta\|^2 = 0$$

Donde $\|u\|^2 = u^T u$

Por consiguiente si:

$$J = (b - H\theta)^T (b - H\theta) = (b^T - \theta^T H^T) (b - H\theta)$$

$$J = b^T b - b^T H\theta - \theta^T H^T b + \theta^T H^T H\theta$$

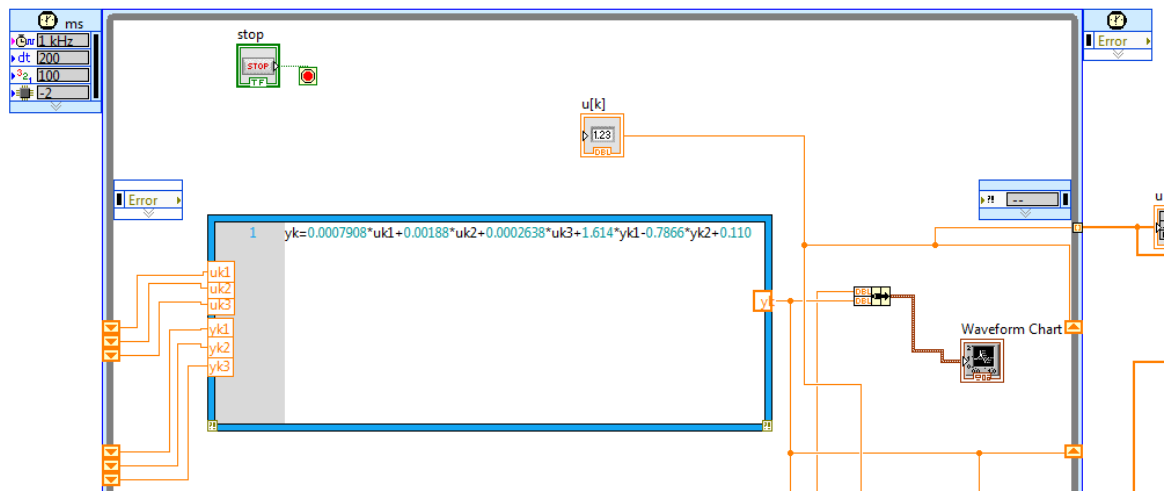
$$\frac{dJ}{d\theta} = 0 \quad \frac{dJ}{d\theta} = -2H^T b + 2HH^T \theta = 0$$

$$2H^T H \theta = 2H^T b \quad H^T H \theta = H^T b$$

$$\theta = (H^T H)^{-1} H^T b$$

En la implementación que se realiza por medio del software LabView (ver ilustración 26), inicialmente utilizamos una estructura denominada timed loop, el cual es un ciclo While con un temporizador que permite realizar la configuración del tiempo de muestreo del sistema que ya se había determinado anteriormente con un valor de 200 milisegundos, adicionalmente se utiliza una estructura de MathScript que es el ambiente que nos permitirá realizar la simulación del sistema utilizando comandos similares a los que son utilizados en Matlab, en el primer bloque ubicamos la ecuación en diferencia del sistema de tercer orden que se obtuvo de Matlab donde los valores del numerador son los valores correspondientes a $u[k]$ y los valores del denominador corresponden a $y[k]$, es importante recordar que los valores para $y[k]$ se ponen con el signo opuesto en la ecuación en diferencias, para los valores de $y[k - n]$ y $u[k - n]$ se utiliza un Shift Register que nos permite tener los valores que necesitemos según el orden de la planta.

Ilustración 26 Identificación del sistema

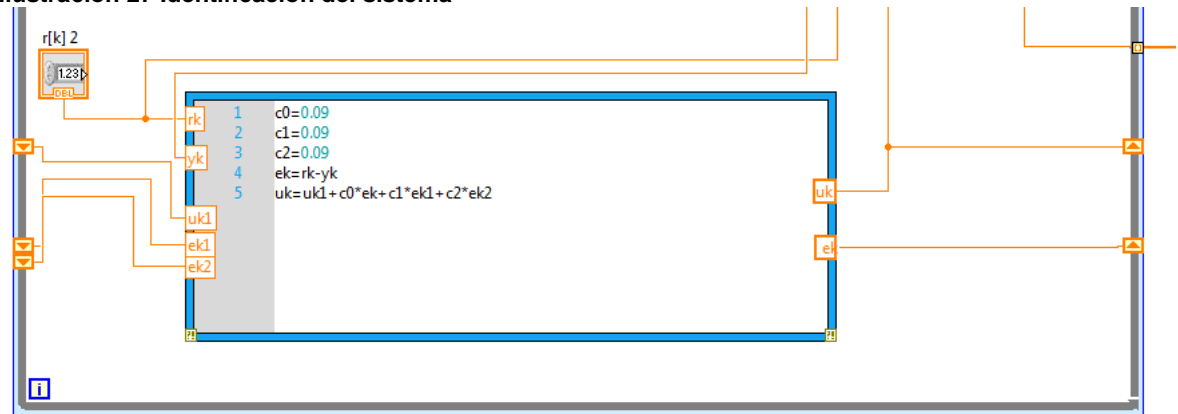


Fuente: Autor

Después cuando se realice la implementación real el bloque donde está la ecuación en diferencias se cambiara por los valores de medición de los instrumentos de medida y los actuadores, para continuar con la identificación utilizamos otro bloque de MathScript donde utilizaremos un controlador (ver ilustración 27) basado en el error, este controlador puede ser sencillo y nos servirá

para mostrar cómo se comportara el sistema realizando variaciones en las constantes del controlador, puede pasar que en la simulación la planta no se estabilice, sin embargo no es inconveniente para la identificación del sistema ya que solo necesitamos datos de la variación entre las entradas y las salidas lo cual representa la ventaja de que podemos identificar cualquier sistema y que dependiendo de los valores que obtengamos se seleccione el controlador que mejor se ajuste a los parámetros de funcionamiento.

Ilustración 27 Identificación del sistema

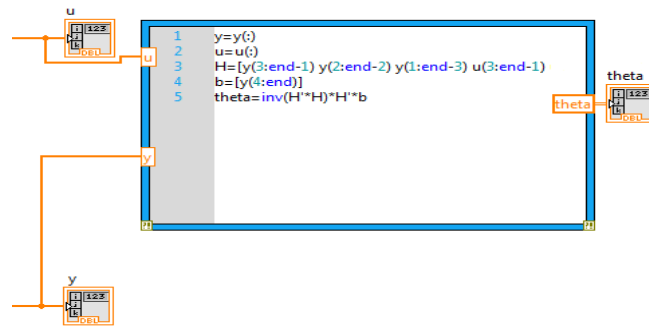


Fuente: Autor

Para la construcción de la matriz de Hankel se necesita construir dos vectores que contengan los datos recolectados de los valores medidos en $y[k]$ y $u[k]$, con estos valores utilizamos otro bloque de MathScript que en esta ocasión se ubica por fuera de la estructura While (ver ilustración 28), en esta nueva estructura se inicia dando la respectiva ubicación a los valores de medida de entradas y salidas según el orden del sistema que se desea identificar y la construcción del vector b , después de esto se realiza la solución de la matriz con las ecuaciones que se encontraron anteriormente, al final del proceso lo que se encontrara serán los valores de la función de transferencia del sistema (ver ilustración 29), si el proceso se realiza por medio de simulación los valores de θ deben de coincidir con los valores de la ecuación en diferencias, en un sistema real la exactitud de los resultados de θ depende de la cantidad de muestras que se tomen, por consiguiente entre mayor sea la cantidad de muestras el resultado estará más cerca de la función de transferencia del sistema, estos modelos de identificación se realizan en sistemas complejos que por su construcción dificultan la realización de un modelamiento matemático, además que es una herramienta que en la práctica permite reducir tiempos y costos de elaboración, lo que significa un gran

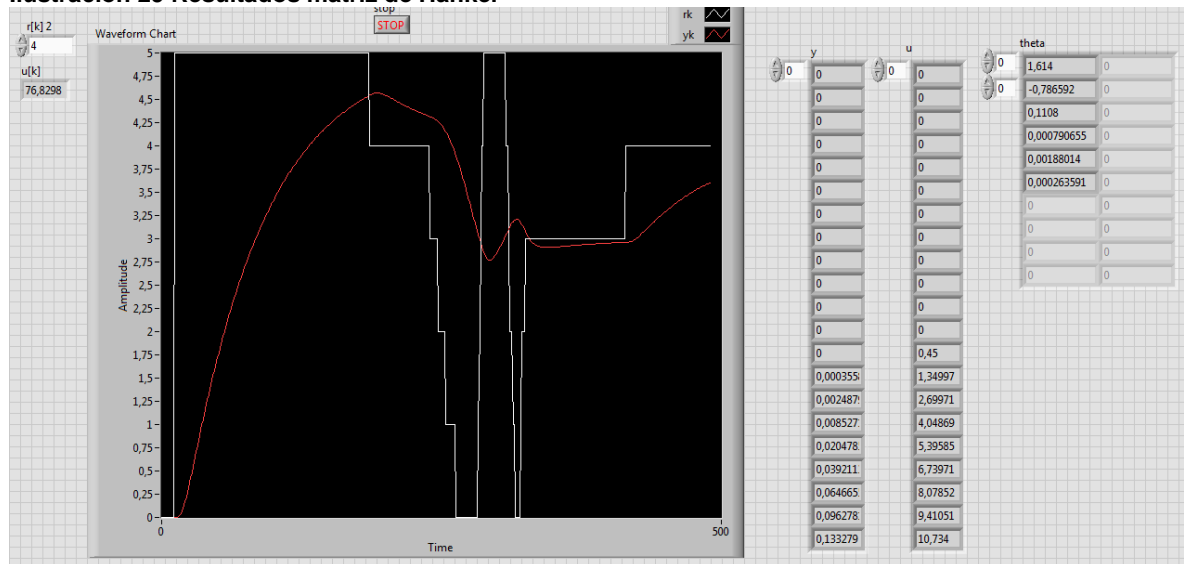
aporte para la elaboración de este proyecto ya que dependiendo de los resultados de las pruebas simuladas se toman las decisiones necesarias para intervenir la caldera, previniendo así un accidente por mala manipulación y teniendo seguridad de que se necesitara a la hora de la implementación en el sistema de los diferentes instrumentos de medida y la técnica de control a utilizar.

Ilustración 28 Matriz de Hankel



Fuente: Autor

Ilustración 29 Resultados matriz de Hankel



Fuente: Autor

3.2 SELECCIÓN TÉCNICA DE CONTROL

Para la selección de la técnica de control se plantea tres posibles configuraciones como son el PID tipo I, el PID tipo II, y un controlador por reubicación de polos, lo que se quiere lograr es encontrar las diferencias que se puede presentar entre uno y otro controlador, como también con cual obtenemos la mejor respuesta para el sistema con el fin de obtener el mejor aprovechamiento de la caldera mejorando su eficiencia y aumentando el nivel de seguridad.

3.2.1 CONTROL CON PID TIPO I

El control PID tipo I es el controlador básico dentro de la familia de los PID, estos controladores generalmente se aplica a diversos procesos por su simplicidad y fácil configuración, pero es ahí mismo donde tiene su mayor debilidad, como es un controlador simple en algunos sistemas inestables no se adapta muy bien por lo cual no tiene la capacidad de estabilizar el sistema, para la construcción de un PID tipo se parte con un sistema identificado de primer orden.

$$H(z) = \frac{b_0}{z + a_1}$$

Donde $Y(z) = H(z)U(z)$, donde se plantea la estructura del control en lazo cerrado, y se da la función básica del controlador PID.

$$C(z) = \frac{C_0Z^2 + C_1Z + C_2}{Z^2 - Z}$$

Se calcula es sistema en lazo cerrado

$$Y(z) = H_{LC}(z)R(z)$$

Donde

$$H_{LC}(z) = \frac{H(z)C(z)}{1 + H(z)C(z)}$$

Reemplazando la función de transferencia $C(z)$ y $H(z)$ se tiene

$$H_{LC} = \frac{\left(\frac{b_0}{Z + a_1}\right) \left(\frac{C_0 Z^2 + C_1 Z + C_2}{Z^2 - Z}\right)}{1 + \left(\frac{b_0}{Z + a_1}\right) \left(\frac{C_0 Z^2 + C_1 Z + C_2}{Z^2 - Z}\right)}$$

$$H_{LC} = \frac{b_0(C_0 Z^2 + C_1 Z + C_2)}{(Z + a_1)(Z^2 - Z) + b_0(C_0 Z^2 + C_1 Z + C_2)}$$

Para el polinomio en lazo cerrado se define un polinomio deseado ($P_D(z)$) del mismo orden y se encuentra C_0 , C_1 y C_2 , donde se compara con el polinomio en lazo cerrado de la función ($P_{LC}(Z)$).

$$P_{LC}(Z) = Z^3 + (a_1 - 1 + b_0 C_0)Z^2 + (-a_1 + b_0 C_1)Z + b_0 C_0$$

$$P_D(Z) = (Z - \alpha_1)(Z - \alpha_2)(Z - \alpha_3)$$

Definido lo anterior se selecciona los α con polos estables, por consiguiente si $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3 = 0$ entonces $P_D(z) = Z^3$ y las constantes del controlador:

$$a_1 - 1 + b_0 C_0 = 0 \quad C_0 = \frac{1 - a_1}{b_0}$$

$$-a_1 + b_0 C_1 = 0 \quad C_1 = \frac{a_1}{b_0}$$

$$b_0 C_2 = 0 \quad C_2 = 0$$

Donde la ecuación del controlador es

$$U(z) = C(z)E(z)$$

Y en término de las muestras se tiene

$$U[k] = \frac{C_0 + C_1 q^{-1} + C_2 q^{-2}}{1 - q^{-1}} e(z)$$

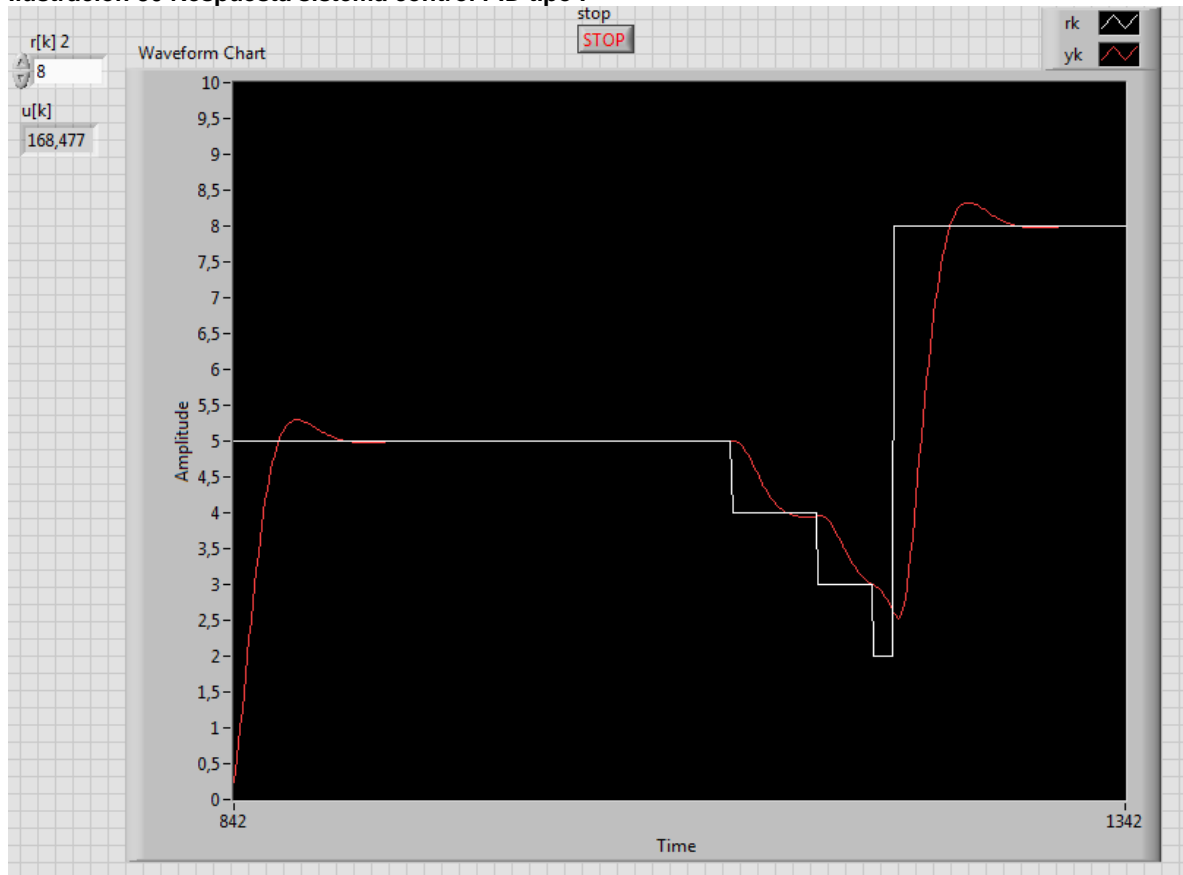
Es decir

$$U[k] = U[k - 1] + C_0e[k] + C_1e[k - 1] + C_2e[k - 2]$$

La ecuación anterior es la misma que se utilizó en la etapa de identificación, el motivo por el cual se utiliza es que se está trabajando un sistema simulado que puede llegar a ser inestable, de tal manera que cuando se hace la identificación sin un control básico como lo es el PID tipo I, la identificación de la planta no siempre puede ser la más acertada, y de esta manera el diseño del controlador no concordara con las necesidades del sistema.

En la simulación realizada con el sistema encontrado en Matlab, modificando los valores de los coeficientes del controlador se observó una buena adaptabilidad en la señal de salida del sistema (ver ilustración 30), y se determina que puede ser un control apropiado para la caldera, aunque hay aspectos que se pueden mejorar como el tiempo de respuesta.

Ilustración 30 Respuesta sistema control PID tipo I



Fuente: Autor

3.2.2 CONTROL CON PID TIPO II

EL controlador PID tipo II es un poco más complejo que el anterior que vimos, ya que este sistema está diseñado para controlar sistemas de segundo más complejos, el planteamiento y desarrollo del controlador es similar pero en este caso se inicia el desarrollo del controlador con una función de transferencia de segundo orden, de tal manera que considerando un modelo identificado de la siguiente manera se desarrolla un PID tipo II.

$$H(z) = \frac{b_0Z + b_1}{Z^2 + a_1Z + a_2}$$

Se define el controlador de la forma

$$C(Z) = \frac{C_0Z^2 + C_1Z + C_2}{(Z - 1)(Z + C_3)}$$

Se encuentra la función en lazo cerrado de la forma

$$H_{LC}(Z) = \frac{C(z)H(z)}{1 + C(Z)H(z)}$$

$$H_{LC}(z) = \frac{\left(\frac{C_0Z^2 + C_1Z + C_2}{(Z - 1)(Z + C_3)}\right)\left(\frac{b_0Z + b_1}{Z^2 + a_1Z + a_2}\right)}{1 + \left(\frac{C_0Z^2 + C_1Z + C_2}{(Z - 1)(Z + C_3)}\right)\left(\frac{b_0Z + b_1}{Z^2 + a_1Z + a_2}\right)}$$

Donde el polinomio en lazo cerrado del sistema es

$$P_{LC}(Z) = (Z - 1)(Z + C_3)(Z^2 + a_1Z + a_2) + (C_0Z^2 + C_1Z + C_2)(b_0Z + b_1)$$

$$P_{LC}(z) = (Z^2 + (C_3 - 1)Z - C_3)(Z^2 + a_1Z + a_2) + (C_0Z^2 + C_1Z + C_2)(b_0Z + b_1)$$

$$P_{LC}(z) = Z^4 + (C_3 - 1 + a_1 + C_0b_0)Z^3 + (a_2 + a_1(C_3 - 1) - C_3 + C_0b_1 + C_1b_0)Z^2 + (a_2(C_3 - 1) - C_3a_1 + C_2b_0 + C_1b_1)Z + (-C_3a_2 + C_2b_1)$$

Se compara con un polinomio deseado así:

$$P_D(Z) = Z^4 + \beta_1Z^3 + \beta_2Z^2 + \beta_3Z + \beta_4$$

$$C_3 - 1 + a_1 + C_0 b_0 = \beta_1$$

$$a_2 + a_1 C_3 - a_1 - C_3 + C_0 b_1 + C_1 b_0 = \beta_2$$

$$a_2 C_3 - a_2 - C_3 a_1 + C_2 b_0 + C_1 b_1 = \beta_3$$

$$-C_3 a_2 + C_2 b_1 = \beta_4$$

$$\begin{bmatrix} b_0 & 0 & 0 & 1 \\ b_1 & b_0 & 0 & a_1 - 1 \\ 0 & b_1 & b_0 & a_2 - a_1 \\ 0 & 0 & b_1 & -a_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_0 \\ C_1 \\ C_2 \\ C_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \beta_1 + 1 - a_1 \\ \beta_2 + a_1 - a_2 \\ \beta_3 + a_2 \\ \beta_4 \end{bmatrix}$$

La ecuación en diferencia es

$$U(z) = C(z)E(z)$$

$$U(z) = \frac{C_0 Z^2 + C_1 Z + C_2}{Z^2 + (C_3 - 1)Z - C_3} E(Z)$$

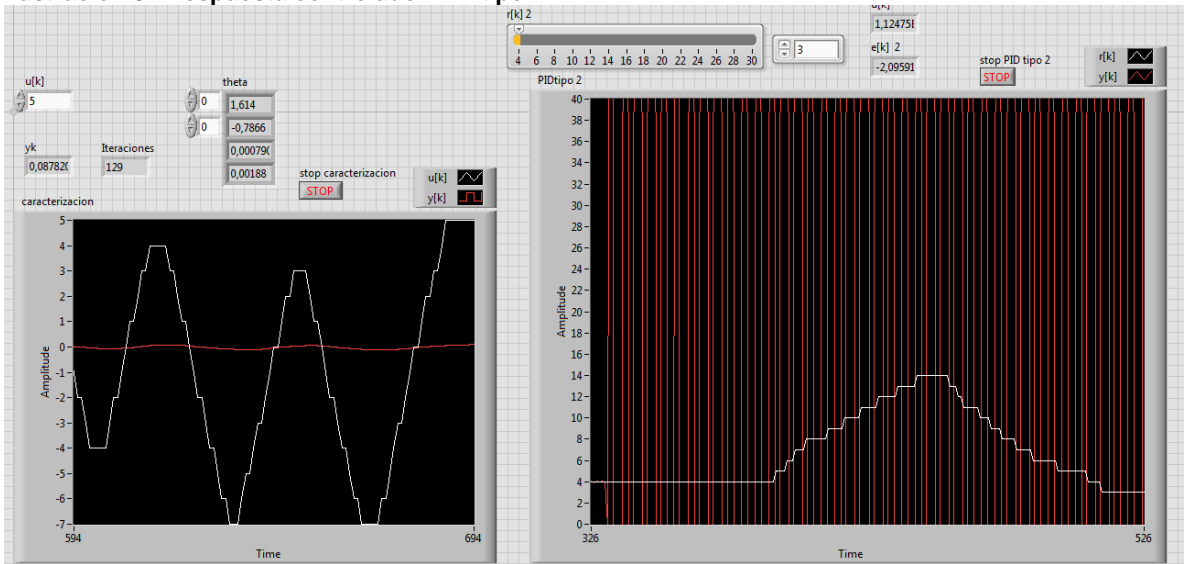
Y la ecuación en diferencias de la siguiente manera

$$U[k] = \frac{C_0 + C_1 q^{-1} + C_2 q^{-2}}{1 + (C_3 - q^{-1}) - C_3 q^{-2}} e[k]$$

$$U[k] = -(C_3 - 1)U[k - 1] + C_3 U[k - 2] + C_0 e[k] + C_1 e[k - 1] + C_2 e[k - 2]$$

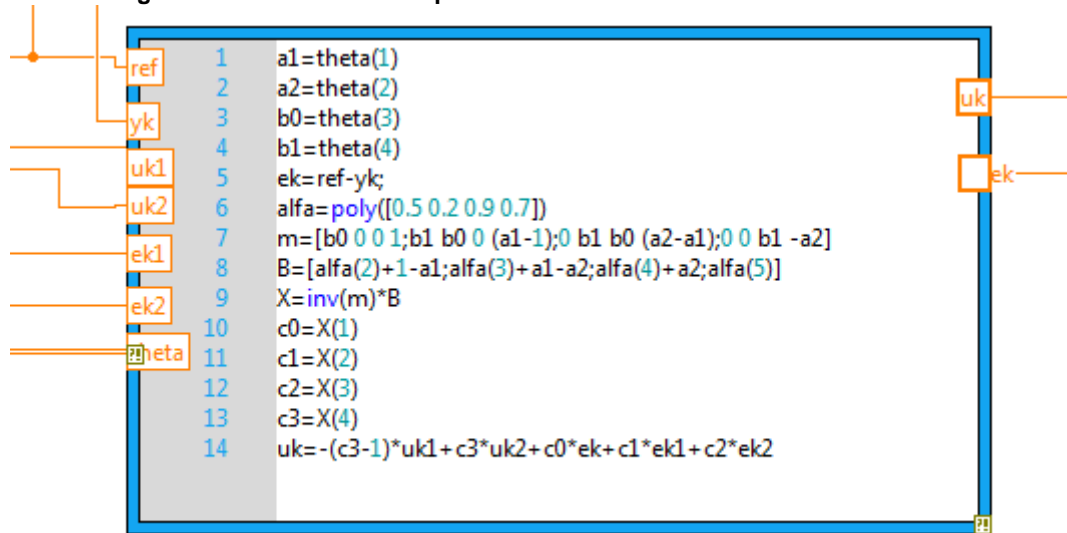
Para este controlador la etapa de identificación se montó a parte del controlador del sistema, para reconocer el comportamiento de ambos por separado pero para el sistema con el cual se ha trabajado desde el principio adquirido de Matlab aleatoriamente este controlador es lo suficientemente robusto para estabilizar el sistema (ver ilustración 31), que incluso realizando variaciones en el polinomio deseado dentro del algoritmo del controlador (ver ilustración 32) se logró que controlara el sistema, lo que nos indica que no siempre un controlador así este se encuentre bien diseñado servirá para controlar cualquier tipo de planta, como se había mencionado anteriormente uno de los problemas de la familia de controladores PID es su simpleza, que aunque también representa una ventaja en términos de diseño y elaboración no siempre tienen la capacidad de controlar sistemas que se tornan inestables.

Ilustración 31 Respuesta controlador PID tipo II



Fuente: Autor

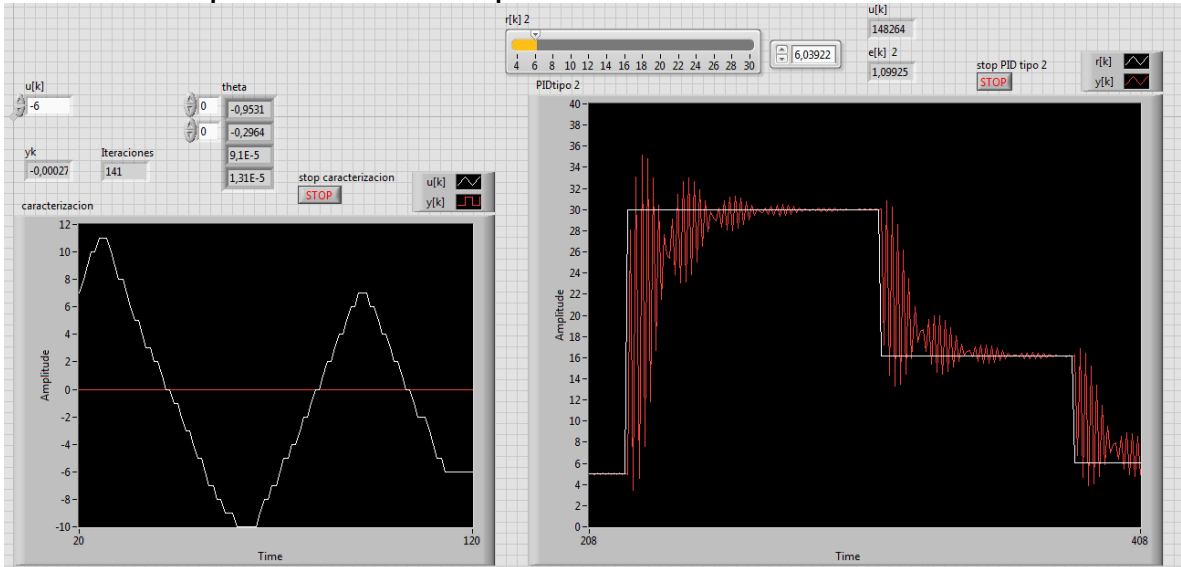
Ilustración 32 Algoritmo controlador PID tipo II



Fuente: Autor

Para comprobar que el algoritmo funcionara se realizó la simulación con otra función de transferencia distinta a la obtenida en Matlab, en esta nueva simulación se verifico el buen funcionamiento y operatividad del controlador PID tipo II, el resultado de la simulación fue satisfactorio (ver ilustración 33), igualmente se realizó el proceso de identificación y luego se simulo el controlador que funciono acorde a las necesidades del sistema.

Ilustración 33 Respuesta controlador PID tipo II con sistema diferente



Fuente: Autor

3.2.3 CONTROL POR REUBICACIÓN DE POLOS

Es una técnica de control que se realimenta así mismo, donde la misma variable que se desea regular retroalimenta al sistema, actuando sobre las respuestas naturales del sistema comparando las variables de estado con las variables deseadas en el sistema logrando hacer comportar al sistema de manera arbitraria, inicialmente antes de diseñar el controlador por reubicación de estados debemos conocer como es la representación en espacio de estados.

La representación en espacio de estados es una caracterización del sistema que se hace a partir de las variables de estado, que son el número mínimo de cantidades que permite representar el comportamiento del sistema y que puede generar cualquier variable de salida a partir de una combinación de las variables de entrada.

Se define $x(t)$ como el vector de estado, $x \in R$

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix}$$

Las ecuaciones de estado son ecuaciones diferenciales de primer orden que relacionan las variables de estado con las variables de entrada

$$\dot{x} = \frac{dx}{dt} = f(x(t), u(t))$$

Donde f es una función vectorial no lineal o lineal que relaciona $x(t)$ y $u(t)$ con $\frac{dx}{dt}$ y la ecuación de salida está dada por:

$$y(t) = g(x(t), u(t))$$

Donde g es una función vectorial no lineal o lineal que relaciona $x(t)$ y $u(t)$ con $y(t)$

$$G = \begin{cases} \dot{x} = f(x(t), u(t)) \\ y(t) = g(x(t), u(t)) \end{cases}$$

Para el caso lineal

$$G = \begin{cases} \dot{x} = Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) = Cx(t) + Du(t) \end{cases}$$

Ya para el modelo de representación en espacio de estados del controlador se utiliza las funciones en tiempo discreto

$$x[k + 1] = Fx[k] + Gu[k]$$

$$y[k] = Cx[k] + Du[k]$$

Donde

$$x[k] = \varphi[k - 1]$$

$$x[k + 1] = \varphi[k]$$

$$C = \theta^T[k] = [-a_1 \quad -a_2 \quad \dots \quad -a_n \quad b_0 \quad b_1 \quad \dots \quad b_{n-1}]$$

$$D = 0$$

$$F = \begin{bmatrix} -a_1 & -a_2 & & -a_n & b_0 & b_1 & & b_{n-1} \\ 1 & \ddots & & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ \vdots & 1 & & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & \vdots & \dots & 0 & \vdots & \vdots & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots & 1 & \ddots & & 0 \\ 0 & \vdots & & \vdots & 0 & 1 & & 0 \end{bmatrix}$$

Se define una señal de control de la forma

$$U[k] = -k_a x[k] + k_g r[k] \quad k_a = [k_1 \quad k_2 \quad \dots \quad k_{2n}]$$

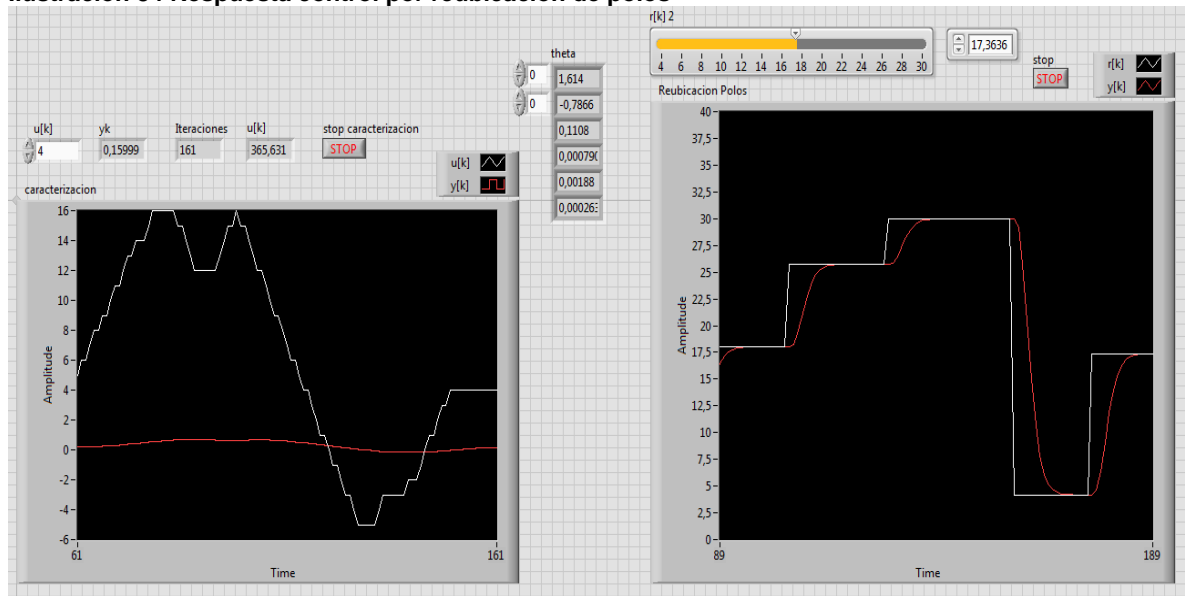
$$k_g = \frac{1}{C(I - F + Gk_a)^{-1}G}$$

Y un polinomio deseado de la siguiente forma

$$P_d(Z) = \det(ZI - F + Gk_a)$$

Dentro de los controladores utilizados para la realización de este proyecto con el que mejor respuesta del sistema simulado adquirido a través de Matlab, ha sido el controlador por reubicación de polos (ver ilustración 34), el cual en la simulación mostro tiempos de estabilización mucho mejores que los del PID tipo I, y el PID tipo II que no controla la planta, la respuesta de este controlador representa una mejoría en la eficiencia de la caldera, aumentando así mismo la seguridad en el ambiente que la rodea con un controlador más seguro y confiable con el que se puede variar la presión según las necesidades del sistema, también se resalta la simpleza en la implementación del algoritmo (ver ilustración 35), que se soluciona en gran parte a la utilización de la función Acker.

Ilustración 34 Respuesta control por reubicación de polos



Fuente: Autor

Ilustración 35 Algoritmo control por reubicación de polos

```
1  xk=[yk1;yk2;yk3;uk1;uk2;uk3]
2  C=(theta(:))'
3  F=[theta(1) theta(2) theta(3) theta(4) theta(5) theta(6); 1 0 0 0 0 0;
4  G=[0;0;0;1;0;0];
5  P=[0.3 0.3 0.3 0.3 0.3 0.3];
6  Ka= acker(F,G,P);
7  Kg=1/(C*(inv(eye(6))-F+G*Ka))*G;
8  uk=(-Ka)*xk + (Kg(1,1))*rk
9  uk=uk(1,1)
10
11
```

Fuente: Autor

Para la implementación en el sistema real se utiliza la plataforma Arduino, quien será la encargada de la recolección y adaptación de los datos para posteriormente ser interpretados por los diferentes algoritmos de los controladores que se simularon, igualmente en los algoritmos se cambia el bloque donde se encontraba la función en diferencias de la planta por las conexiones que provienen del Arduino de esta manera obtendremos las medidas reales del sistema, esto sirve tanto para la etapa de identificación como para la etapa de control, es importante resaltar que la parametrización de los sensores se pueden realizar directamente en el algoritmo, pero antes de esto es recomendable hacer pruebas que nos permita los valores de voltaje para cada sensor con las variables de medida en su valor máximo y en su valor mínimo, así se permitirá conocer la resolución de cada dispositivo si esta no es dada por el fabricante, o se cerciorara del buen funcionamiento de la instrumentación.

Una de las ventajas más representativas en haber seleccionado un sistema de tercer orden para realizar las simulaciones, es la respuesta y el tiempo de estabilización que mejoran considerablemente al realizar un control más complejo y más robusto con mayor capacidad de controlar la variable deseada, de tal manera que se pueda aumentar la eficiencia energética en la caldera, por último la selección de las variables para encontrar la función de transferencia en Matlab se hizo con la intención de representar lo polos en diferentes estados donde se encuentra un polo muy estable (-7), uno intermedio (-3), y uno muy poco estable (-1), lo cual no significa que las simulaciones no sean capaz de trabajar con otros sistemas, por lo cual también la utilización de tercer orden en la etapa de identificación que permitirá conocer la función de transferencia muy exacta de sistemas comunes como el de la caldera ya que se diseñó con la capacidad de identificar sistemas que no son totalmente controlables.

4. DISEÑO INTERFAZ DE USUARIO

Aprovechando la utilización de la plataforma Arduino y la necesidad de poder visualizar las variables sin necesidad de movilizarse directamente hasta el lugar, aumentando de tal manera la seguridad el lugar ya que el operario de la caldera no tendrá que estar revisando periódicamente para cerciorarse del buen funcionamiento y de que los parámetros no presenten medidas peligrosas para la integridad de la caldera y en especial de las personas que se encuentren desarrollando sus tareas en el laboratorio, se elabora una interfaz de usuario donde se podrá ver con facilidad variables tales como presión, temperatura, nivel de agua del suministro, estado del quemador, entre otras según la necesidad del operario, como también se observara la activación de alarmas de ser necesario en caso de que las condiciones de funcionamiento se salgan por fuera de los parámetros normales de funcionamiento.

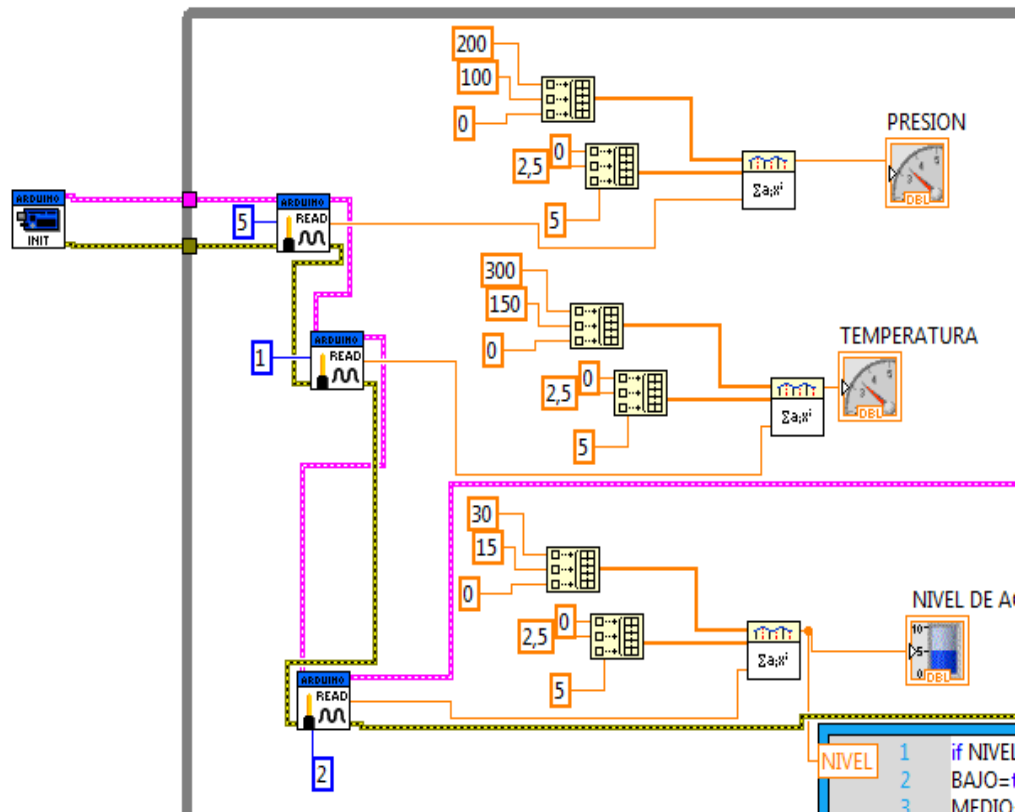
Inicialmente para la elaboración de la interfaz de usuario para la caldera del laboratorio de automatización se debe estar seguro de la salida de los sensores, ya que esta debe de ser de 0 a 5V, adicionalmente a esto cada uno de los sensores se debe de parametrizar permitiendo tener los valores reales medidos en tiempo real cuando la interfaz esté en funcionamiento, posterior a esto se debe configurar la conexión entre los instrumentos y el computador, estos parámetros de conexión se establecen por medio del software que provee el fabricante del Arduino en el cual se carga un archivo llamado LIFA_Base, que permite acondicionar las señales para que puedan ser interpretadas por el ordenador.

Con la comunicación establecida entre los instrumentos de medida y el computador en el software LabView se puede realizar el diseño y configuración de los elementos que se quieren visualizar, primeramente inicializamos la comunicación con el toolkit de Arduino que debe ser descargado he instalado adicionalmente debido a que el software no lo contiene, también para este caso se instaló un toolkit que nos permite realizar programación con pseudocódigo similar al utilizado en Matlab que es MathScript, el que también se utilizó en la etapa de identificación y selección de la técnica de control.

Después de tener los mínimos parámetros de conexión, se configura las entradas con las que se trabajara, y que como ya se ha mencionado antes en este proyecto se trabajara con las tres más importantes las cuales son la presión, la temperatura

y el nivel en el reservorio de agua, la configuración básicamente es asignar un pin de entrada del Arduino en el cual se deberá conectar la señal de salida del sensor, con el pin asignado (ver ilustración 36) se realiza el tratamiento de la señal necesario para cada sensor, normalmente se realiza una parametrización de los valores que queremos medir, para realizar debemos conocer los valores de diferentes medidas y realizar las pruebas correspondientes para obtenerlos, para tener unas medidas precisas se debe medir el voltaje mínimo de salida en las posiciones de medición mínima de cada sensor adaptado al sistema, y los valores máximos en los valores máximos de operación del sistema, como la caldera puede ser un dispositivo volátil si se superan los valores de operación, las medidas de los valores máximos se deberán realizar con valores que no superen los valores de operación seguros según las indicaciones del fabricante, con estos valores dentro de la simulación se realiza una interpolación que permite conocer los valores para diferentes puntos dependiendo de los valores medidos.

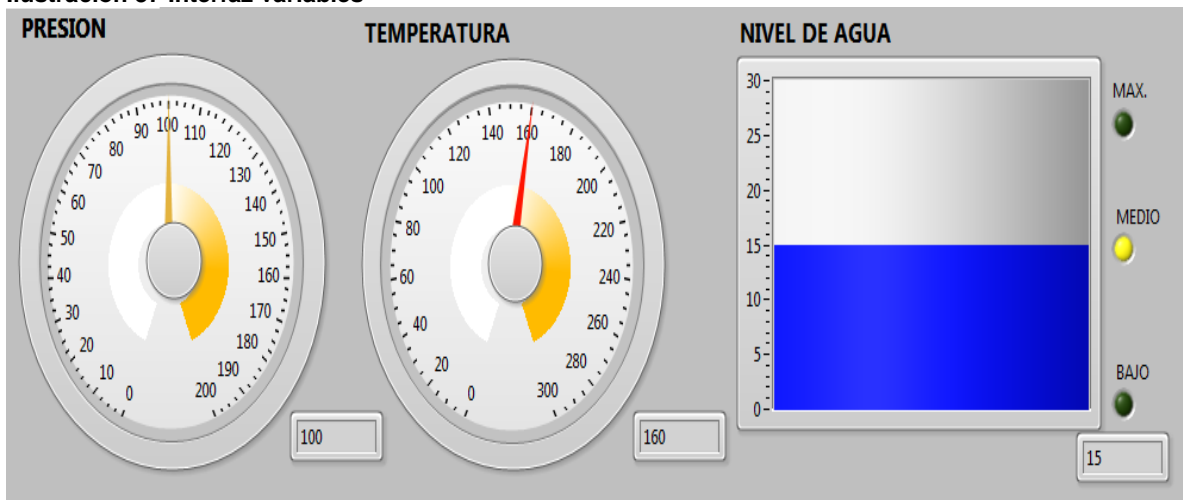
Ilustración 36 Interpolación de los sensores



Fuente: Autor

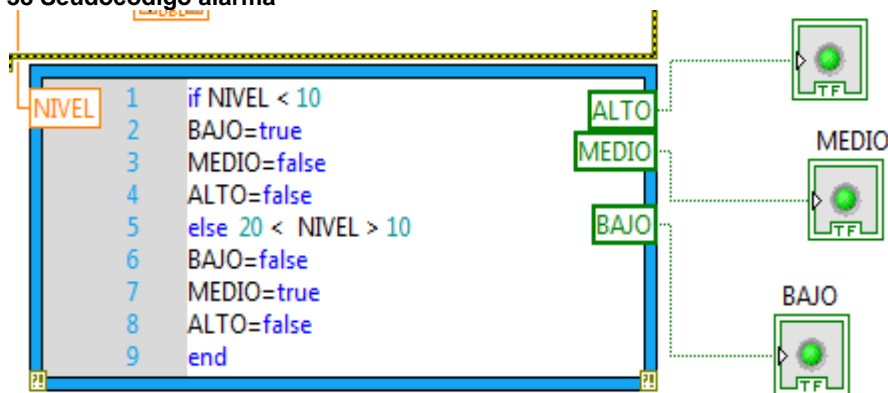
Los valores de operación que se definieron (ver ilustración 37) fueron de 0 a 200PSI para la presión, de 0 a 300°C para la temperatura y de 0 a 30gal, también se utilizó una alarma que se ubicó enseguida del medidor de nivel, que indica el valor del nivel en el reservorio de agua ya que si este llega a ser demasiado bajo la caldera se puede quedar sin suministro y se abre la posibilidad de que ocurra un siniestro, por tal motivo de manera preventiva si esto llegara a suceder automáticamente se dispararía una alarma que alertara al operario de que algo está sucediendo, la activación de la alarma (ver ilustración 38), se logró utilizando un código sencillo en el MathScript, e igualmente esta alarma se puede replicar para las otras variables obteniendo un sistema autónomamente seguro.

Ilustración 37 Interfaz variables



Fuente: Autor

Ilustración 38 Seudocódigo alarma



Fuente: Autor

Adicionalmente se utilizaron switches (ver ilustración 49) para el encendido de la caldera y la activación de la válvula de seguridad como medida de seguridad, permitiendo la activación de un mecanismo de seguridad, también se utilizó un visualizador que enseña el estado del quemador evidenciando si este se encuentra encendido o no, las salidas tiene la misma configuración que las entradas al sistema la diferencia es la selección del bloque del Arduino, en el caso de necesitar enviar una señal de salida se selecciona un bloque de escritura contrario a cuando se desea recibir una señal de entrada en el que se utiliza un bloque de lectura.

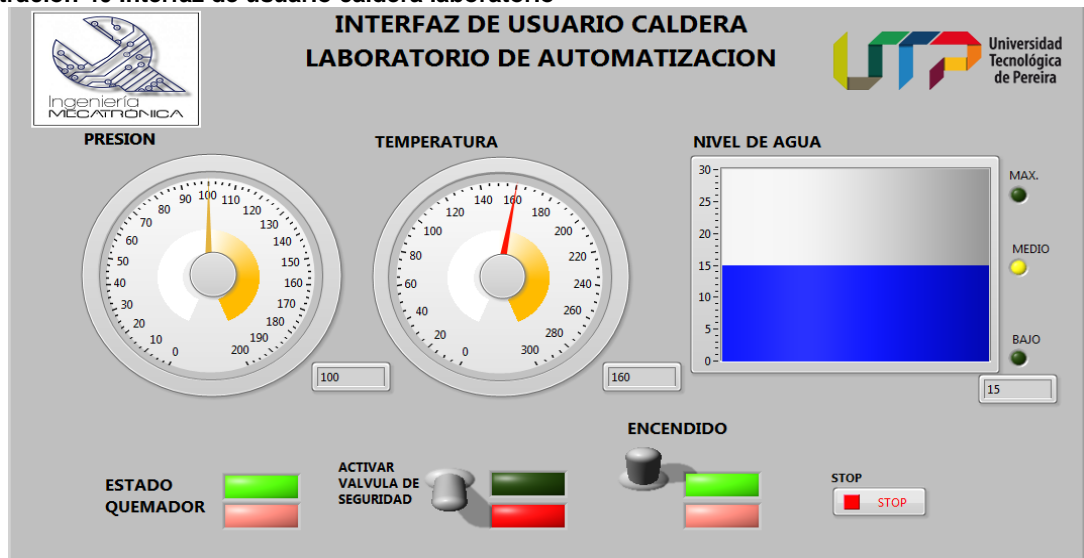
Ilustración 39 Interfaz switches



Fuente: Autor

Como resultado final del producto (ver ilustración 40) se consigue una interfaz amigable con una fácil y rápida interpretación de los elementos necesarios para cerciorarse del buen funcionamiento de la caldera y que de las medidas no sobrepasen los valores de seguridad mínimos establecidos, y de ser necesario está la posibilidad de integrar fácilmente más valores de medida si estos llegan a ser necesario.

Ilustración 40 Interfaz de usuario caldera laboratorio



Fuente: Autor.

5. ANALISIS DE COSTOS

Para la realización del proyecto se deben adquirir diferentes elementos, los cuales están comprendidos en infraestructura, elementos mecánicos, elementos eléctricos, elementos electrónicos y para la parte de la mano de obra se debe contar con tres tipos de profesionales (técnico, tecnólogo e ingeniero en mecatrónica). Para determinar el precio de cada uno de ellos se investigan los precios de proveedores y el cobro de la mano de obra en la región.

5.1 COMPONENTES ELÉCTRICOS.

Tabla 12 Presupuesto componentes eléctricos

Componentes eléctricos.		
Elemento	Cantidad	Precio
Sensor de temperatura	1	\$924.774
Sensor de presión	1	\$407.338
Sensor de nivel	1	\$270.041
Arduino	1	\$55.000
Cable	30	\$30.000
Pulsadores	3	\$30.000
	TOTAL=	\$1'717.153

Fuente: Autor

5.2 ELEMENTOS MECÁNICOS.

Estos se comprenden como los elementos que ayudan a los elementos eléctricos a realizar su funcionamiento.

Tabla 13 Presupuesto componentes mecánicos

Componentes eléctricos.		
Elemento	Cantidad	Precio
Protección Arduino.	1	\$150.000
Adaptadores de sensores	3	\$300.000
Locación de supervisión.	1	\$200.000
	TOTAL=	\$650.000

Fuente: Autor

5.3 MANO DE OBRA.

Para el cálculo del costo de la mano de obra, primero se debe conocer cuáles son las tarifas actuales determinadas por el gobierno de Colombia, con esto se podrá calcular el tiempo en horas y así asignarse el valor preciso por la prestación del servicio profesional.

La formación técnica en Colombia en promedio devenga un salario mensual de \$942.493 pesos. Al hacerse el cálculo la hora de trabajo tiene un costo de \$5890,58 pesos.

La formación tecnológica en Colombia en promedio devenga un salario mensual de \$1'078.161 pesos. Al hacerse el cálculo la hora de trabajo tiene un costo de \$6738,50 pesos.

La formación de ingeniería en Colombia en promedio devenga un salario mensual de \$1'441.447 pesos. Al hacerse el cálculo la hora de trabajo tiene un costo de \$9009,04 pesos.

Tabla 14 Presupuesto Mano de obra

Presupuesto mano de obra.			
Trabajo a realizar	Profesión	Horas laboradas	Precio
Adaptación de elementos eléctricos.	Técnico profesional en Mecatrónica.	40	\$235.623
Implementación de protecciones y líneas de alimentación.	Tecnólogo profesional en Mecatrónica	48	\$323.448
Supervisión e implementación de la programación.	Ingeniero en Mecatrónica.	88	\$792.795
		TOTAL=	\$1'351.866

Fuente: Autor

5.4 PRESUPUESTO FINAL.

Tabla 15 Costos del proyecto

Presupuesto final	
Elemento eléctricos	\$1'717.153
Elementos mecánicos	\$650.000
Mano de obra	\$1'351.866
Costo del diseño 30%	\$1'157.705
TOTAL	\$4'876.724

Fuente: Autor

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 CONCLUSIONES

- Se logra realizar un reconocimiento amplio y completo de los elementos que componen la caldera, permitiendo conocer el estado actual, los riesgos y la necesidad de la actualización en los instrumentos de medición, de tal manera que permita generar ambientes más seguros y medidas más confiables de los procesos físicos que suceden en el interior de la caldera.
- Por medio de la utilización de dispositivos electrónicos, como sensores de carácter industrial y uso de la plataforma Arduino, se permite medir las variables involucradas en el proceso, sin la necesidad de la intervención humana, disminuyendo la posibilidad de presentarse accidentes por lecturas erróneas y alertando al operario sobre cambios bruscos que se salen del rango de valores mínimos para el adecuado funcionamiento de la caldera.
- Contemplando que la presión es la variable más característica en el proceso habitual de la caldera, se realiza un control que permite aumentar la eficiencia de la misma, proporcionando mejores tiempos de estabilización, con lo que se obtienen datos en tiempo real del estado de la presión dentro de la caldera. Al realizar un diseño del control de presión y la instrumentación digital de la caldera, acorde a las normas establecidas por la ASME (Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos), se garantiza que todos los procedimientos que se realicen en el sistema estarán bajos los parámetros adecuados para un trabajo seguro.
- Se resalta la aplicación de los conocimientos adquiridos en el programa de ingeniería Mecatrónica, en el área de la investigación de las actividades industriales, representado en un diseño caracterizado por las condiciones tanto técnicas como de seguridad. Abriéndose nuevos campos de acción para esta disciplina que cada día ayuda a solucionar los problemas de la sociedad de una manera simple acorde a todas las normas establecidas para trabajar en este medio.

6.2 RECOMENDACIONES

- Para implementar cada uno de los sensores primero se deberán hacer pruebas donde se evidencie el correcto funcionamiento, y donde se reconozcan la precisión de las medidas que brindara los dispositivos.
- En el momento de la instalación de cada uno de los elementos que se utilizaran se deberá realizar en compañía de personal calificado que se cerciore de la correcta instalación y de que no se presenten fallas por fugas de tal manera que se evite un accidente por una mala manipulación de la caldera.

7. BIBLIOGRAFIA

[1] Imágenes calderas. [EN LINEA]. [Citado el 02 de marzo de 2015]. Disponible en < www2.spiraxsarco.com/ar/pdfs/training/gcm_04.pdf>

[2] Imagen caldera compacta. [EN LINEA]. [Citado el 03 de marzo de 2015]. Disponible en < http://www.fenercom.com/pages/pdf/formacion/13-01-23_Jornada%20calderas%20industriales/02-Tipologia-de-calderas-VIESSMANN-fenercom-2013>

[3] Imagen partes caldera. TECNIK. MANUAL DE FUNCIONAMIENTO Y MANTENIMIENTO PARA CALDERA VERTICAL PRODUCCIÓN DE VAPOR CAPACIDAD 6 B.H.P. PARA COMBUSTION DE ACPM MARCA TECNIK SERIE No. 852 (OP-12-059)- M1515 (OP-12-045). Bogotá D.C.

[4] Imagen Arduino Uno R3. [EN LINEA]. [Citado el 12 de abril de 2015]. Disponible en < http://arduino.cc/en/uploads/Main/ArduinoUno_R3_Front.jpg>

[5] Ilustración Sensor de presión. [EN LINEA]. [Citado el 13 de Abril de 2015]. Disponible en < <http://es.omega.com/pptst/DPGM409DIFF.html>>.

[6] Ilustración Sensor de temperatura. [EN LINEA]. [Citado el 13 de Abril de 2015]. Disponible en < <http://www.solostocks.com/venta-productos/recambios-sistema-electrico/sensores/sensor-temperatura-ir-m12-5868653>>

[7] Ilustración Sensor de nivel. [EN LINEA]. [Citado el 13 de Abril de 2015]. Disponible en < <http://sensovant.com/productos/caudal-nivel-fluidos/sensores-Nivel-de-liquidos/sensores-capacitivos/articulo/sensor-de-nivel-liquidos-industrial-GSlevel.html>>

[8] KOHAN Anthony L. MANUAL DE CALDERAS. Principios operativos de mantenimiento, construcción, reparación, seguridad, requerimientos y normativas. VOLUMEN I. España. 2000

[9] KOHAN Anthony L. MANUAL DE CALDERAS. Principios operativos de mantenimiento, construcción, reparación, seguridad, requerimientos y normativas. VOLUMEN II. España. 2000

[10] DULHOSTE Jean-François. INSTRUMENTACION. Escuela de Ingeniería Mecánica. Universidad de los Andes. Venezuela.

[11] CORTES GARZON Cesar Augusto. Identificación de sistemas lineales y no-lineales multivariables por espacio de estados. Estudio [Tesis de Maestría]. Universidad Tecnológica de Pereira. Colombia

[12] GARRIDO Santiago. Identificación, estimación y Control de Sistemas No-lineales mediante RGO. Estudio [Tesis Doctoral]. Universidad Carlos III de Madrid. España.

[13] CREUS Antonio. INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL DE PROCESOS. Octava Edición. Alfaomega. México. 2010.

[14] OGATA Katsuhiko. SISTEMA DE CONTROL EN TIEMPO DISCRETO. Segunda Edición. TKM Productions. México. 1996.