



Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Química

**IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL AUTOMÁTICO PARA UNA CALDERA  
ACUATUBULAR DE BAGAZO DE RAQUIS Y COQUITO DE PALMA AFRICANA**

**Lenin Rolando Velásquez Rosales**  
Asesorado por el Ing. David Ricardo Cerezo Toledo

Guatemala, septiembre de 2014

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL AUTOMÁTICO PARA UNA CALDERA  
ACUATUBULAR DE BAGAZO DE RAQUIS Y COQUITO DE PALMA AFRICANA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**LENIN ROLANDO VELÁSQUEZ ROSALES**

ASESORADO POR EL ING. DAVID RICARDO CEREZO TOLEDO

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO QUÍMICO**

GUATEMALA, SEPTIEMBRE DE 2014

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Narda Lucía Pacay Barrientos
VOCAL V	Br. Walter Rafael Véliz Muñoz
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Orlando Posadas Valdez
EXAMINADOR	Ing. Manuel Gilberto Galván Estrada
EXAMINADOR	Ing. Víctor Manuel Monzón Valdez
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

## **HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL AUTOMÁTICO PARA UNA CALDERA ACUATUBULAR DE BAGAZO DE RAQUIS Y COQUITO DE PALMA AFRICANA**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha 07 de mayo del 2013.



**Lenin Rolando Velásquez Rosales**

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS  
DE GUATEMALA



Guatemala 22 de abril del 2014

FACULTAD DE INGENIERÍA

Ingeniero  
Víctor Monzón  
Director Escuela Ingeniería Química  
Presente

Estimado Ingeniero Monzón:

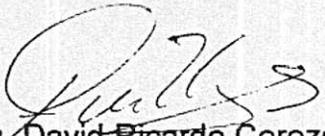
Atentamente me dirijo a usted para informarle que he asesorado el Trabajo de Graduación titulado: **"IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL AUTOMÁTICO PARA UNA CALDERA ACUATUBULAR DE BAGAZO DE RAQUIS Y COQUITO DE PALMA AFRICANA"**, desarrollado por el estudiante de Ingeniería Química Lenin Rolando Velásquez Rosales, carné No. 1999-11047.

Por lo cual, después de haber asesorado el trabajo de Graduación, considero que llena los requisitos para su aprobación.

Sin otro particular me suscribo de usted,

Atentamente,

ID Y ENSEÑAD A TODOS

  
Ing. David Ricardo Cerezo  
ASESOR

David Ricardo Cerezo Toledo  
Ingeniero Químico  
Colegiado: 1169



Guatemala, 24 de julio de 2014  
Ref. EIQ.TG-IF.023.2014

Ingeniero  
**Víctor Manuel Monzón Valdez**  
DIRECTOR  
Escuela de Ingeniería Química  
Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero Monzón:

Como consta en el registro de evaluación del informe final EIQ-PRO-REG-007 correlativo **009-2012** le informo que reunidos los Miembros de la Terna nombrada por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del:

### INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADUACIÓN

Solicitado por el estudiante universitario: **Lenin Rolando Velásquez Rosales**.  
Identificado con número de carné: **1999-11047**.

Previo a optar al título de **INGENIERO QUÍMICO**.

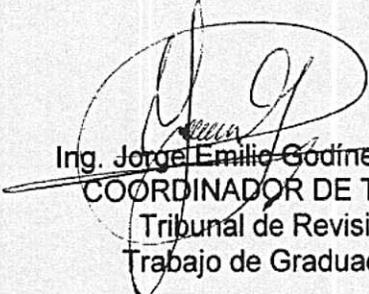
Siguiendo los procedimientos de revisión interna de la Escuela de Ingeniería Química, los Miembros de la Terna han procedido a **APROBARLO** con el siguiente título:

#### IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL AUTOMÁTICO PARA UNA CALDERA ACUATUBULAR DE BAGAZO DE RAQUIS Y COQUITO DE PALMA AFRICANA

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por el Ingeniero Químico: **David Ricardo Cerezo Toledo**.

Habiendo encontrado el referido informe final del trabajo de graduación **SATISFACTORIO**, se autoriza al estudiante, proceder con los trámites requeridos de acuerdo a las normas y procedimientos establecidos por la Facultad para su autorización e impresión.

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"

  
Ing. Jorge Emilio Godínez Lemus  
COORDINADOR DE TERNA  
Tribunal de Revisión  
Trabajo de Graduación



C.c.: archivo





Ref.EIQ.TG.182.2014

El Director de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor y de los Miembros del Tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química para revisar el Informe del Trabajo de Graduación del estudiante, **LENIN ROLANDO VELÁSQUEZ ROSALES** titulado: "IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL AUTOMÁTICO PARA UNA CALDERA ACUATUBULAR DE BAGAZO DE RAQUIS Y COQUITO DE PALMA AFRICANA". Procede a la autorización del mismo, ya que reúne el rigor, la secuencia, la pertinencia y la coherencia metodológica requerida.

Ing. Victor Manuel Monzón Valdez  
DIRECTOR  
Escuela de Ingeniería Química



Guatemala, septiembre 2014

Cc: Archivo  
VMMV/ale





DTG. 492.2014

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al Trabajo de Graduación titulado: **IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL AUTOMÁTICO PARA UNA CALDERA ACUATUBULAR DE BAGAZO DE RAQUIS Y COQUITO DE PALMA AFRICANA**, presentado por el estudiante universitario **Lenin Rolando Velásquez Rosales**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos  
Decano

Guatemala, 22 de septiembre de 2014

/gdech



## **ACTO QUE DEDICO A:**

- Dios** Por ser el creador y perfeccionador de mi carrera y de mi vida, y por haberme dado las capacidades y las oportunidad de estudiar.
- Virgen María** Por su amor de madre y por acompañarme siempre.
- Mis padres** Rolando Velásquez y Raquel Rosales. Su amor, apoyo y enseñanzas me han llevado a alcanzar mis metas y a ser quien soy.
- Mi esposa** Helene Marie Sliwinski, por su amor, compañía y apoyo incondicional en todo.
- Mi hija** María Teresa, el motor de mis luchas y esfuerzos, mi regalo de Dios.

## **AGRADECIMIENTOS A:**

**Universidad de San  
Carlos de  
Guatemala**

Por ser el lugar de mi influencia y crecimiento académico.

**Facultad de  
Ingeniería**

Donde la siembra de mis esfuerzos ha dado su fruto.

**Mis catedráticos**

Por el conocimiento y el ejemplo, que son parte del profesional que hoy soy.

**Mi familia**

Por todo su apoyo y amor.

**Mi asesor**

Ing. David Cerezo, por toda su ayuda, apoyo y orientación.

**Mis amigos**

Por haberme acompañado en todo este proceso con su ayuda, cariño y alegría.



3.	DISEÑO METODOLÓGICO.....	23
3.1.	Variables .....	23
3.2.	Delimitación de campo de estudio .....	23
3.3.	Recursos humanos disponibles .....	24
3.4.	Recursos materiales disponibles (equipo, cristalería, reactivos) .....	24
3.5.	Técnica cualitativa o cuantitativa.....	25
3.6.	Recolección y ordenamiento de la información.....	25
3.7.	Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información.....	27
3.8.	Análisis estadístico.....	28
4.	RESULTADOS.....	31
4.1.	Diagnóstico de la caldera .....	31
4.2.	Cantidad de lazos de control.....	31
4.3.	Cantidad de señales analógicas y digitales.....	31
4.4.	Diagrama de lazos de control.....	33
4.5.	Propuesta económica a SIMCA .....	35
4.6.	Coordinación con SIMCA la implementación del sistema de control automático.....	38
4.7.	Porcentaje de reducción de combustible.....	39
5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS .....	41
	CONCLUSIONES.....	45
	RECOMENDACIONES .....	47
	BIBLIOGRAFÍA.....	49
	APÉNDICES.....	51
	ANEXOS.....	53

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1.	Manómetro (Sistema Bourdon) .....	8
2.	Transmisor y sensor de presión diferencial ( <i>straning gauge</i> ).....	9
3.	Medidores de presión diferencial pierna seca .....	11
4.	Pierna húmeda.....	12
5.	Termocopla .....	14
6.	RTD's.....	15
7.	Recolección y ordenamiento sobre la información de la caldera acuautubular.....	26
8.	Diagrama de lazos de la caldera acuautubular.....	34

### TABLAS

I.	Variables de la caldera acuautubular .....	23
II.	Cantidad de señales analógicas .....	32
III.	Cantidad de señales digitales .....	32
IV.	Cotización presentada a SIMCA .....	35
V.	Coordinación de la implementación con SIMCA .....	38
VI.	Comparativo previo y después a la automatización .....	39



## LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
$\Delta$	Delta, cambio, diferencia
$^{\circ}\text{C}$	Grados de temperatura Celsius
$^{\circ}\text{F}$	Grados de temperatura Fahrenheit
$\mathfrak{H}_m$	Hipótesis nula
$\mathfrak{H}_a$	Hipótesis alternativa
$\int$	Integral
$\rho$	$\rho$ , densidad del fluido ( $\text{kg}/\text{m}^3$ o $\text{lbm}/\text{pies}^3$ )
$\%$	Porcentaje
$\propto$	Proporcional



## GLOSARIO

<b>Alcance o span</b>	Es la diferencia algebraica entre los valores superior e inferior del rango del instrumento. Ejemplo: Un transmisor con rango de 30 – 300 grados Fahrenheit tendrá un alcance de 270 grados Fahrenheit.
<b>SIMCA</b>	Servicios Industriales Modernos de Centro América S. A.
<b>Rango</b>	Son los valores comprendidos entre los límites superior e inferior del instrumento, se expresa por los dos valores extremos. Ejemplo: 30 – 300 grados Fahrenheit, 0 – 1 000 PSI.
<b>Control</b>	Tiene por objetivo determinar el comportamiento de un fenómeno.
<b>Control de procesos</b>	Conjunto de acciones que persiguen que la transformación de un producto en otro sea predecible y que se logre obtener el resultado de las características deseadas.
<b>Controlador</b>	Estudia la variable medida y luego determina la acción que el dispositivo de control debe realizar a fin de que la variable medida y por lo tanto la variable controlada, resulte igual a la referencia.

<b>Controladores</b>	Los controladores reciben las señales procedentes de los transmisores las indica y/o registra. Los controladores envían otra señal de salida, normalmente de 3-15 psi en señal neumática, o 4-20 mA en señal eléctrica de corriente. Esta señal de salida actúa sobre el elemento final de control.
<b>Densidad de la masa</b>	Es definida como la masa del fluido está dada en unidad de volumen. Es medida en kilogramos por metro cúbico ( $\text{kg/m}^3$ ) en el S.I. y libras masa por pies cúbicos ( $\text{lbm/pe}^3$ ) en U.S.
<b>Diagrama de bloques</b>	Un diagrama de bloques de un sistema es una representación gráfica de las funciones que lleva a cabo cada componente y el flujo de señales. Un diagrama de bloques tiene la ventaja de indicar en forma más realista el flujo de las señales del sistema real.
<b>Elevación de cero</b>	Es la cantidad con que el valor cero de la variable del proceso es menor que el límite inferior del rango.
<b>Elementos primarios</b>	Están en contacto con la variable y utilizan o absorben energía del medio. Esta energía se convierte para dar al sistema de medición una indicación de la variación de la variable. El efecto del elemento.

<b>Elemento final de control</b>	Recibe la señal del controlador y modifica la variable que está bajo el control, puede ser una válvula, un servomotor, un cilindro, etc.
<b>Error</b>	Es la diferencia entre el valor transmitido por el instrumento y el valor real de la variable medida.
<b>Exactitud</b>	Es la tolerancia de medida del instrumento, define los límites de error del instrumento en condiciones normales de servicio. Puede expresarse de varias maneras; tanto por ciento del alcance por ejemplo $\pm 5 \%$ , valor directo por ejemplo $\pm 2 \text{ }^\circ\text{F}$ , tanto por ciento de la lectura efectuada por ejemplo $\pm 1,5 \%$ ; tanto por ciento del total de la escala.
<b>Gravedad Específica</b>	Es el ratio de la densidad de la masa de un fluido por la densidad de la masa igual al volumen de referencia del fluido.
<b>Histéresis</b>	Es la diferencia de lecturas de un instrumento cuando se lee subiendo la escala y bajando la escala. Esto es más frecuente en instrumentos neumáticos debido al efecto de la fricción, deslizamiento en pivotes y uniones.
<b>Instrumentos ciegos</b>	Son los que no tienen indicación visible de la medida, tales como, interruptores de presión y temperatura.

**Instrumentos  
indicadores**

Disponen de una aguja y de una escala para leer el valor de la variable.

**Proceso**

Conjunto de acciones que persiguen la transformación de un producto en otro, cambiándole una o varias características físicas o químicas, generalmente usando energía en cualquiera de sus formas.

**Presión atmosférica**

Es la presión ejercida por las partículas de la atmósfera terrestre medida mediante un barómetro. Al nivel del mar, esta presión es próxima a 760 mm (29,9 pulgadas) de mercurio absoluto o 14,7 psia (libras por pulgada cuadrada absoluta), estos valores definen la presión atmosférica estándar.

**Presión de vapor**

Es una medida de cómo el fluido es volátil. Presión de vapor corresponde a la presión desarrollada por el fluido cuando este fluye en una tubería a una temperatura dada y el fluido en equilibrio. Está dada en kilo pascal, absoluto (kPa, absoluto) en el S.I. y libras por pulgada cuadrada absolutas (psia) en el U.S.

**Presión diferencial**

Es la diferencia entre dos presiones, presión 1 (P1) menos presión 2 (P2).

<b>Presión manométrica</b>	Es la determinada por la diferencia entre la presión absoluta menos la presión atmosférica del lugar donde se efectúa la medición, hay que notar que cuando aumenta la presión atmosférica también aumenta la presión leída por el instrumento, sin embargo esto es despreciable al medir altas presiones.
<b>Realimentación negativa</b>	Disminuye el efecto de las perturbaciones y tiende a restablecer el equilibrio entre la referencia y la variable medida.
<b>Realimentación positiva</b>	Aumenta el efecto de las perturbaciones y conduce a la inestabilidad. Este tipo de realimentación no se usa jamás en el control de lazo cerrado.
<b>Repetibilidad</b>	Es la capacidad de leer repetidamente el mismo valor a idénticos valores de la variable, en las mismas condiciones de servicio. Se da en tanto por ciento del alcance del instrumento. También es conocida como precisión.
<b>Resolución</b>	Es el intervalo más pequeño que un instrumento puede discriminar. Por ejemplo, si las resoluciones de dos termómetros digitales A y B, son 0,1 grados Celsius o Fahrenheit y 1 grados Celsius o Fahrenheit, respectivamente, el termómetro A tiene mejor resolución que el B.

<b>Ruido o <i>noise</i></b>	Perturbaciones eléctricas o señales accidentales que modifican la indicación o transmisión de la medición.
<b><i>Set point</i></b>	También llamado Valor de Referencia y corresponde al valor que esperamos mantener en la variable de proceso por medio de la acción del controlador.
<b>Sensibilidad</b>	Es la relación entre el cambio de la lectura y el cambio real de la variable después que ésta ha alcanzado el reposo. No debe confundirse la sensibilidad con la banda muerta. Se da en tanto por ciento del alcance del instrumento.
<b>Sistema</b>	Es una combinación de componentes que actúan juntos y realizan un objeto determinado. Un sistema no necesariamente es físico. Por tanto, la palabra sistema debe interpretarse como una implicación de sistemas físicos, biológicos, económicos y similares.
<b>Sistema de control en lazo abierto</b>	Los sistemas en los cuales la salida no afecta la acción de control. En un sistema de control en lazo abierto no se mide la salida ni se realimenta para compararla con la entrada
<b>Sistemas de control en lazo cerrado</b>	En un sistema de control en lazo cerrado, se alimenta al controlador la señal de error de actuación, que es la diferencia entre la señal de entrada y la señal de realimentación (que puede ser la señal de salida misma o una función de la señal de

salida), a fin de reducir el error y llevar la salida del sistema a un valor conveniente. El término control en lazo cerrado siempre implica el uso de una acción de control realimentado para reducir el error del sistema.

**Supresión de cero**

Es la cantidad con que el valor cero de la variable de proceso es mayor que el límite inferior del rango.

**Temperatura de servicio**

Rango de temperatura dentro del cual el instrumento funciona con los límites y errores especificados.

**Vacío**

Es la diferencia entre la presión atmosférica existente y la presión absoluta, el vacío es la presión medida por debajo de la presión atmosférica, viene expresado en milímetros columna de mercurio (mmHg), milímetros columna de agua (mm“H<sub>2</sub>O).

**Válvulas de control**

La válvula de control realiza la función de variar el caudal del fluido de control que modifica a su vez el valor de la variable medida. Para esto se comporta como un orificio que varía continuamente su área.

**Variable**

Característica física de un proceso que puede tomar diferentes valores. Ejemplo: presión, temperatura, etc.

<b>Variable controlada</b>	Conocida como variable de proceso, es la cantidad o condición que se mide y controla. Por lo común, la variable controlada es la salida (el resultado) del sistema.
<b>Variable manipulada</b>	Es la cantidad o condición que el controlador modifica para afectar el valor de la variable controlada.
<b>Zona muerta o banda muerta</b>	Es el pequeño campo de valores en donde el instrumento no cambia su indicación o no cambia su señal de salida. Se da en tanto por ciento del alcance del instrumento.
<b>USD</b>	United States Dollars.

## **RESUMEN**

Hoy en día la industria en Guatemala busca mejorar sus procesos de acuerdo a la estrecha competitividad que se percibe cuando se comercializan productos. El ingeniero químico como responsable de proceso busca mejorar sus procesos y utiliza los diferentes medios, métodos y herramientas que sean necesarias para lograr dicha mejora.

Se presenta el trabajo de graduación titulado Implementación de un sistema de control automático para una caldera acuatubular de bagazo de raquis y coquito de palma africana, en donde básicamente se determinó la cantidad de señales analógicas y digitales que participan en el sistema así como la cantidad de lazos de control, se presentó una propuesta económica de diseño y se evaluó la mejora obtenida posterior a la implementación del sistema de control automático.



## **OBJETIVOS**

### **General**

Implementar un sistema de control automático para una caldera acuatubular utilizando como combustible el bagazo de raquis y coquito de palma africana.

### **Específicos**

1. Realizar un diagnóstico de la caldera acuatubular para apoyar la propuesta de diseño en la automatización.
2. Determinar la cantidad de lazos de control que son necesarios para la automatización de la caldera acuatubular.
3. Determinar la cantidad de señales analógicas y digitales que participan en la automatización.
4. Elaborar un diagrama sobre la automatización de la caldera acuatubular de acuerdo a los lazos de control definidos.
5. Presentar a Sistemas Industriales Modernos de Centro América, S. A. (SIMCA S. A.) una propuesta económica y de diseño sobre la automatización de la caldera acuatubular.

6. Coordinar con Sistemas Industriales Modernos de Centro América, S. A. (SIMCA S. A.) la implementación de un sistema de control automático para una caldera acuatubular de bagazo de raquis y coquito de palma africana.
7. Evaluar el porcentaje de reducción del combustible utilizado después de la automatización.

## **Hipótesis**

### **Hipótesis científica**

La automatización mejora la eficiencia de la caldera acuatubular.

### **Hipótesis estadística**

- Hipótesis nula ( $H_0$ ): No existe mejora de la eficiencia utilizando la caldera acuatubular de forma manual o de forma automática.

$$\mathfrak{z}_m = \mathfrak{z}_a$$

- Hipótesis alternativa ( $H_a$ ): Existe diferencia en la eficiencia de la caldera acuatubular utilizándose de forma manual o de forma automática.

$$\mathfrak{z}_m \neq \mathfrak{z}_a$$

Donde

$\mathfrak{z}_m$  : Eficiencia de la caldera acuatubular manejada de forma manual.

$\mathfrak{z}_a$  : Eficiencia de la caldera acuatubular manejada de forma automática.

## INTRODUCCIÓN

El desarrollo tecnológico permite que las industrias puedan ser controladas de forma automática, lo que conlleva a la obtención de procesos mejorados. Dentro de este desarrollo tecnológico la automatización es una herramienta que puede brindar soluciones integrales para los procesos de manufactura.

El presente trabajo desarrolla la implementación de un sistema de control automático para una caldera acuatubular de bagazo de raquis y coquito de palma africana. Se documentan conceptos básicos de instrumentación y control automático.



## **1. ANTECEDENTES**

La producción de calor fue uno de los primeros pasos del hombre en el campo de la técnica; se utilizó en forma relativamente rudimentaria hasta fechas muy recientes. Fue la utilización del vapor como fuerza motriz lo que hizo posible la revolución industrial del siglo XVIII y el desarrollo del generador de vapor de gran potencia, ha hecho surgir la era de electrificación del siglo XX.

Las fábricas modernas, los grandes edificios y el confort en los hogares, son únicamente posibles gracias a la electricidad, el vapor destinado a procesos industriales y a las plantas de calefacción central.

Las calderas se utilizan comúnmente en diversos tipos de procesos de manufactura. La producción de vapor y calor se ha convertido en una actividad práctica complicada. El equipo básico de una instalación para producir vapor (agua caliente) y ciertamente el componente más costoso del conjunto, consta de la simple cámara para generar calor, la caldera, el fogón y sus estructuras. A esto hay que agregar los quemadores mecánicos, hogares enfriados por agua, supercalentadores, economizadores, calentadores de aire y otros accesorios relacionados con las calderas, tales como desaireadores de agua de alimentación, ventiladores para tiro forzado o inducido, bombas y aparatos similares, para la formación de unidades generadoras de mayor capacidad y más completas.

El Decreto N° 48 de 1984 define una caldera como: “un recipiente metálico en el que se genera vapor a presión mediante la acción del calor”.

En septiembre del 2003 el estudiante Fredy Arturo Valle Estévez en su trabajo de graduación titulado *Documentación de procedimientos y operación de una caldera acuotubular de 225,000 lb-vapor/hr en un ingenio azucarero (Ingenio Magdalena S. A.)* indica “la automatización de una caldera es una parte muy importante, ya que con ella se logra tener un control muy exacto de la operación de la caldera, todas las mediciones y parámetros, sirven para establecer rangos adecuados de trabajo para la caldera, por eso exponemos los diferentes tipos de instrumentos de medición que se utiliza en la caldera, y algunos otros”.

También en septiembre del 2003 el estudiante Everaldo Abdías Chan Coyoy en su trabajo de graduación titulado *Diseño de operación de una planta termoeléctrica en un ingenio azucarero*, realiza los procedimientos documentos de una planta termoeléctrica y dentro de los equipos se documentó la operación de una caldera. El estudiante Chan indica en una de sus conclusiones del trabajo de graduación: “La necesidad de aplicar controles más efectivos en las operaciones para garantizar la seguridad del personal, la integridad de los equipos y la eficiente continuidad de los procesos, obliga a buscar medios y utilizar métodos o procedimientos en el área de trabajo, al seguir este tipo de normas o guías se incrementa la producción, se obtiene una reducción de los costos de operación y mantenimiento al disminuir las paradas de las unidades”.

En agosto del 2005 el estudiante David Ricardo Cerezo Toledo en su trabajo de graduación titulado *Propuesta de una práctica experimental de control automático del proceso de transferencia de calor, en el intercambiador de tubos concéntricos del Laboratorio Operaciones Unitarias en la Universidad de San Carlos* indica en una sus conclusiones del trabajo de graduación: “La implementación de un sistema de control automático dará como consecuencia una mejora en la toma de los resultados por el alto grado de exactitud de los

equipos, además la relación que el estudiante tendrá con este tipo de equipos será de una relevancia significativa en su futuro profesional”.

La automatización es una herramienta la cual puede mejorar los procesos de manufactura, la seguridad de los colaboradores y la disponibilidad de la información para su análisis y toma de decisión.



## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1. Caldera

La caldera es una máquina o dispositivo de ingeniería diseñado para generar vapor. Este vapor se genera a través de una transferencia de calor a presión constante, en la cual el fluido, originalmente en estado líquido, se calienta y cambia de estado.

La caldera es un caso particular en el que se eleva a altas temperaturas de intercambiadores de calor, en la cual se produce un cambio de fase. Además, es recipiente de presión, por lo cual es construida en parte con acero laminado a semejanza de muchos contenedores de gas.

Dentro del tipo de calderas se encuentran:

Acuotubulares: son aquellas calderas en las que el fluido de trabajo se desplaza por tubos durante su calentamiento. Son las más utilizadas en las centrales termoeléctricas, ya que permiten altas presiones a su salida y tienen gran capacidad de generación.

Pirotubulares: en este tipo, el fluido en estado líquido se encuentra en un recipiente atravesado por tubos, por los cuales circulan gases a alta temperatura, producto de un proceso de combustión. El agua se evapora al contacto con los tubos calientes productos a la circulación de los gases de escape.

## **2.2. Instrumentación**

En todos los procesos es absolutamente necesario controlar y mantener constantes algunas magnitudes, tales como: presión, caudal o flujo, nivel, temperatura, potencial de hidrógeno (pH), etcétera. Los instrumentos de medición y control permiten mantener constantes y regular las magnitudes de una manera más idónea que el propio operador.

Dentro de los diferentes tipos de instrumentos existe una gran variedad de clasificaciones de los instrumentos, dentro de los primeros se encuentran los llamados instrumentos ciegos los cuales no tienen indicación visible de la medida, tales como, interruptores de presión y temperatura.

También se encuentran los que disponen de una aguja y de una escala para leer el valor variable, este tipo de instrumentos se llaman instrumentos indicadores. Así como los instrumentos indicadores existen los instrumentos registradores, los cuales registran con trazos continuos los valores de la variable, estos trazos pueden ser circulares o alargados.

Dentro de estos instrumentos se encuentran los elementos primarios de medición los cuales están en contacto con la variable y utilizan o absorben energía del medio. Esta energía se convierte para dar al sistema de medición una indicación de la variación de la variable. El efecto del elemento primario al sistema de medición pueden ser cambios de presión, fuerza, posición, cambios eléctricos, etc. Por ejemplo, los elementos primarios de nivel, el efecto es la variación de presión hidrostática del fluido bajo medición.

El elemento primario puede estar integrado en el instrumento, como un termómetro de bulbo y capilar. En otros casos el elemento primario no está integrado en el instrumento, como en un transmisor de caudal con placa de orificio como elemento primario.

### **2.2.1. Instrumentos para medir presión**

La medición de presión siempre se hace con respecto a un punto de referencia. La presión manométrica se hace con referencia a la presión atmosférica. Una medición manométrica representa un nivel sobre la presión atmosférica, que es 0 psig.

La medición de presión absoluta se hace sobre vacío absoluto o ausencia total de presión que es 0 psia.

Todas las mediciones de presión son diferenciales aunque estas esencialmente están referenciadas a un punto constante de presión.

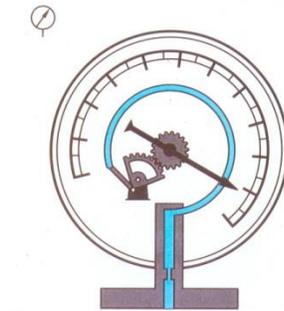
Un medidor de presión diferencial toma la medición de dos puntos de presión en los que ninguno es necesariamente constante y la medición que interesa es la diferencia entre estas dos presiones. Uno de los instrumentos de medición más conocidos es el manómetro

Manómetro (Sistema Bourdon):

Al entrar el aire en el tubo elástico, la presión se reparte homogéneamente. La diferencia de presión entre la superficie exterior A y la superficie interior B produce una fuerza mayor en la superficie exterior, con lo que se produce una deformación elástica. El consiguiente movimiento es

transmitido a una aguja indicadora mediante una palanca, un segmento de ruedas dentadas y un piñón.

Figura 1. **Manómetro (Sistema Bourdon)**

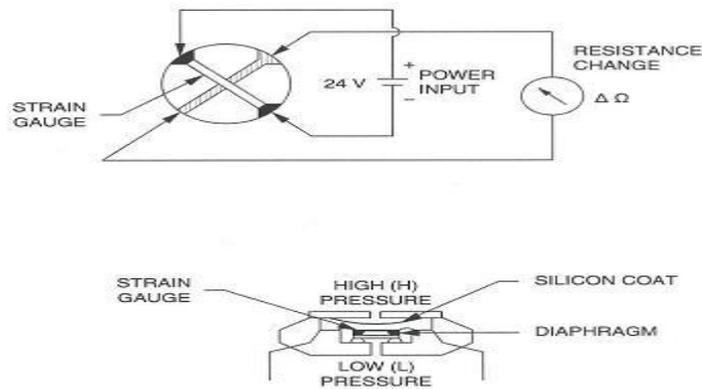


Fuente: Principios de sensores y transductores, Diplomado en instrumentación y automatización, ISA-ATIGUA, p. 6.

### Transmisor de presión diferencial (*strain gauge*)

Consiste en dos elementos básicos: un elemento primario llamado *strain gauge* que censa la presión y la convierte proporcionalmente a una resistencia eléctrica. El elemento secundario convierte la resistencia eléctrica en voltaje o corriente que es aceptable para transmitirlo al controlador.

Figura 2. Transmisor y sensor de presión diferencial (*straining gauge*)



Fuente: Variable medición de presión. Diplomado en instrumentación automatización, ISA-ATIGUA, p. 3

También existen de: un elemento capacitivo variable que convierte la presión en una señal de salida. Se transmite la señal por un diafragma aislante y el fluido de relleno hasta el diafragma sensor. La presión de referencia la siente el otro lado y el cambio en capacitancia generado por ambos lados envía una señal a través de los alambres y hacia el transmisor que los amplifica y cambia a una señal estándar.

### 2.2.2. Instrumento para medir nivel

Se dice que es la medición de la altura de un material (líquido o sólido) en un depósito, sobre una línea de referencia.

En todas las industrias la medida de nivel es muy importante, tanto desde el punto de vista del funcionamiento del proceso como del balance adecuado de materias primas o productos finales.

Los medidores de nivel de líquidos trabajan midiendo directamente la altura del líquido sobre una línea de referencia, midiendo la presión hidrostática, midiendo el desplazamiento de un flotador dentro del propio líquido o aprovechando características físicas del líquido. Los instrumentos que miden el nivel directamente se dividen en: nivel de cristal e instrumentos de flotador.

Los instrumentos que miden el nivel por presión hidrostática se dividen en: medidor manométrico, medidor de membrana, medidor de presión diferencial de diafragma. Los instrumentos que utilizan características físicas del líquido se clasifican en: medidor resistivo, medidor conductivo, medidor de radiación.

#### Medidores de presión diferencial

Consiste en un diafragma en contacto con el líquido del tanque, que mide la presión hidrostática en un punto del fondo del depósito, en un tanque abierto esta presión es proporcional a la altura del líquido y a su gravedad específica.

En el caso en que el tanque esté cerrado y bajo presión hay que corregir la indicación del aparato para la presión ejercida sobre el líquido perdiendo precisión, se suele conectar un tubo a la parte superior del tanque y medir la presión diferencial entre la toma inferior y la superior, cuando los gases de la parte superior del tanque son condensables la toma superior tendrá mayor presión que la inferior, por lo tanto habrá que cambiar las conexiones del instrumento ya que si no indicará bajo cuando esté alto y viceversa.

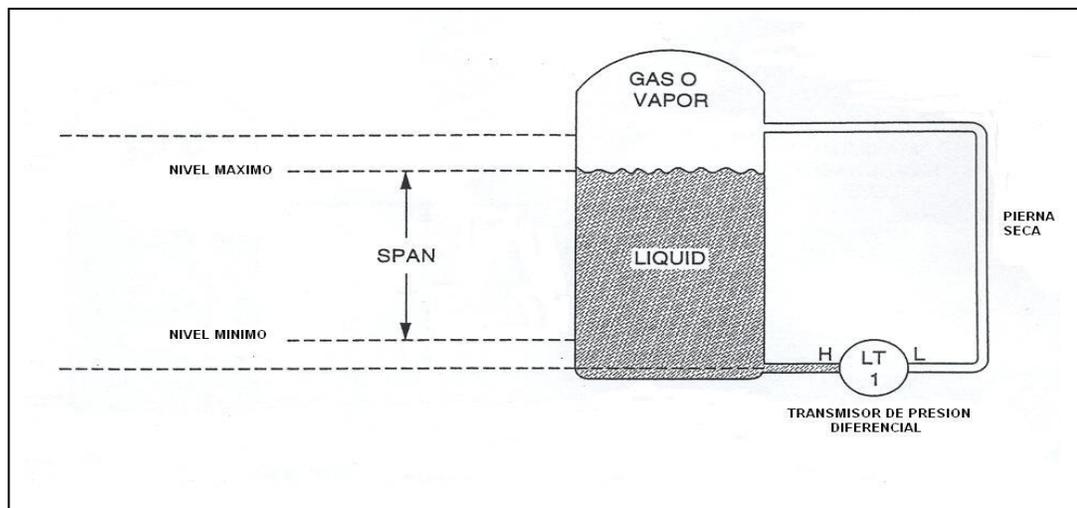
La línea de presión baja del transmisor es llamado pierna de referencia. Hay 2 piernas de referencia usado en el proceso industrial.

## Pierna seca

No contiene líquido, así que la presión del gas o vapor en el tanque, es aplicado directamente al lado bajo del transmisor, (ver figura 3). La salida del transmisor varía directamente proporcional al nivel de líquido.

Cuando hay condensación de gas o vapor y se expone a la toma baja del transmisor la presión hidrostática varía, causando una medición errónea.

Figura 3. **Medidores de presión diferencial pierna seca**



Fuente: Variable medición de presión. Diplomado en instrumentación automatización, ISA-ATIGUA, p. 4.

## Pierna húmeda

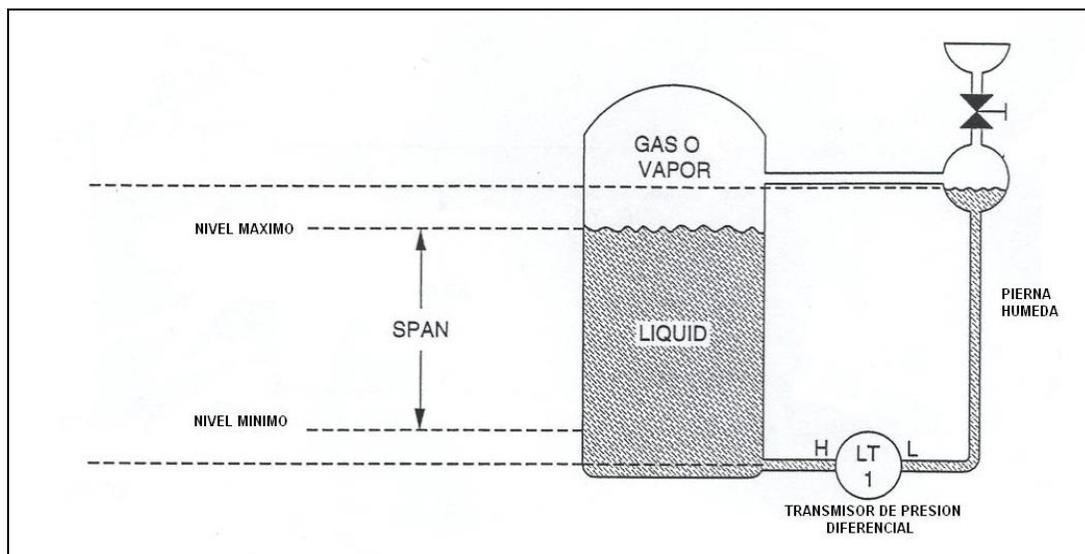
Cuando hay mucha condensación de gas o vapor se utiliza pierna húmeda. Se instala una botella en la parte alta de la pierna para que esta se mantenga siempre llena. Ver figura 4.

Al calibrar el transmisor utilizado con pierna húmeda hay que tomar en cuenta el peso específico del líquido.

La salida del transmisor varía directamente proporcional al nivel del líquido.

El transmisor puede ser localizado abajo o arriba del nivel de referencia. En esta aplicación, el transmisor debe de ser calibrado tomando en cuenta la supresión o elevación del sensor.

Figura 4. **Pierna húmeda**



Fuente: Variable medición de presión. Diplomado en instrumentación automatización, ISA-ATIGUA, p. 5.

### **2.2.3. Instrumento para medir temperatura**

#### Termómetros

Sistemas térmicos a base de presión de vapor. Trabaja con el principio del tubo Bourdon. Parcialmente está lleno con un líquido volátil y de vapor. Opera en base a la presión del vapor.

En los sistemas térmicos a base de presión de vapor el líquido (mercurio, hidrocarburo inerte, xileno) se expande cuando se incrementa la temperatura, entonces, la presión en el tubo Bourdon aumenta y da como resultado el movimiento de él.

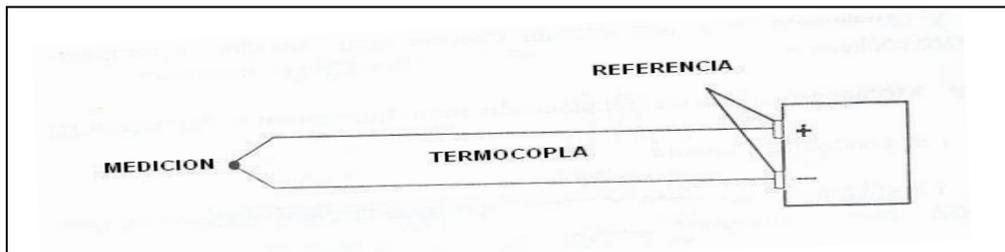
#### Termocoplas

Está compuesta por dos partes principales una unión de referencia o unión fría, que va en el transmisor y una unión de medición que va en el proceso. La diferencia de temperatura entre estos dos puntos genera una señal en milivoltios medida por el transmisor. El cable de termo coplas se usa a veces para llevar la señal de bloque de terminales al transmisor y debe tener las mismas características de la termocopla.

Ventajas y limitaciones:

- Sensibles al ruido
- Amplio rango
- Costo bajo

Figura 5. **Termocopla**



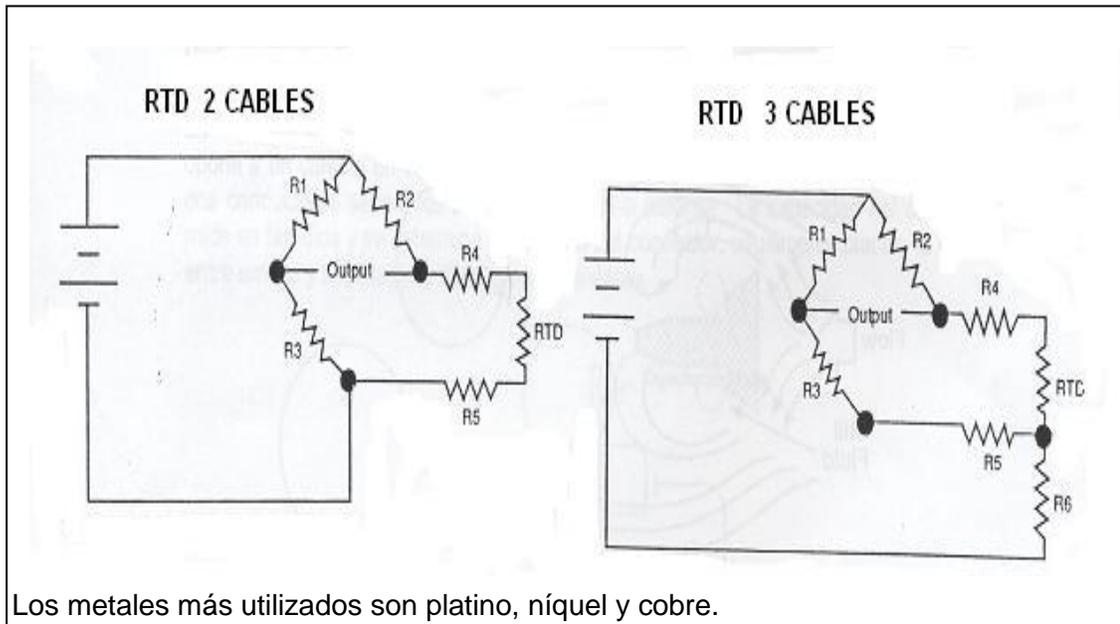
Fuente: Principios de sensores y transductores, Diplomado en instrumentación y automatización, ISA-ATIGUA, p. 4

## RTD

Los detectores de temperatura por resistencia o RTDs funcionan basados en el principio físico que un material metálico variará su resistencia con relación a la temperatura. Hay de muchas formas y configuraciones de acuerdo a su uso.

Usualmente las RTDs se conectan a un circuito de puente de Wheatstone, en el cual las demás resistencias determinan el cero y el *span*. Para evitar problemas de exactitud derivados de larga distancia en los cables es a veces necesario colocar una tercera resistencia, que compensara por inexactitudes resultantes de los cables. Como R4 y R5 tienen la misma temperatura y longitud, los cambios en resistencia se cancelan. La corriente que fluye por R6 no del balancea el puente.

Figura 6. **RTD's**



Fuente: Principios de sensores y transductores, Diplomado en instrumentación y automatización, ISA-ATIGUA, p. 3

### Ventajas y limitaciones

- Buena sensibilidad
- Buena estabilidad
- Buena exactitud
- Tiempo de respuesta lento
- Costo alto

## **2.3. Control automático de procesos**

El control automático de procesos se desarrolla a través de las variables del proceso, el control proporcional, integral y derivativo, lazos de control, transmisores y el control de cascada que se diseñe para la aplicación.

### **2.3.1. Variables de proceso**

La comprensión y determinación de las variables de proceso es el inicio de la instrumentación y por ende del control automático, convirtiendo su comprensión en fundamental dentro del ámbito de la instrumentación. Para poder realizar un buen control final se deben considerar todas las características que envuelven a cada una de estas variables.

### **2.3.2. Controlador proporcional**

El controlador de tipo continuo más simple utilizado en los sistemas realimentados es el controlador proporcional (P). Con un controlador proporcional la acción correctiva, o acción de control, es proporcional al error del proceso, es decir, proporcional a la diferencia entre la referencia y la variable medida. Por ejemplo, en un sistema de control de nivel en que la referencia de nivel permanece fija, el error de nivel aumenta cuando el nivel disminuye. La relación lineal entre el error del proceso y la señal de salida del controlador se puede expresar matemáticamente por medio de la siguiente fórmula:

$$P = K_p * E_p \quad \text{(Ecuación 01)}$$

Donde:

$P$  es la señal de salida del controlador

$K_p$  es la ganancia proporcional

$E_p$  es el error del proceso (referencia menos variable medida).

El controlador proporcional no puede eliminar completamente el error del proceso. Esto se debe a que para mantener la señal de salida del controlador con un valor dado, se requiere un error de régimen. Generalmente, a este error se le llama desviación proporcional y representa la principal desventaja de los controladores proporcionales.

Se puede ayudar a hacer mínima la desviación proporcional, aumentando lo más posible la ganancia proporcional. Lamentablemente, incrementando la ganancia proporcional también se aumenta la tendencia hacia la inestabilidad. En realidad, cuando la ganancia es muy elevada, el controlador proporcional se comporta como un controlador de dos posiciones y presenta oscilaciones alrededor de la referencia. Por lo tanto, aumentar la ganancia proporcional no es una solución ideal para eliminar el error del proceso.

### **2.3.3. Controlador proporcional, integral y derivativo (PID)**

El controlador proporcional, integral y derivativo (P.I.D.), también llamado controlador de tres modos, es la prolongación natural de los controladores P, P.I. y P.D.

Combina las ventajas de cada acción de control individual. Por lo tanto, se puede usar para controlar casi todos los procesos.

La acción de control PID se puede expresar matemáticamente mediante la siguiente ecuación:

$$P = K_p * E_p + K_p * K_i \int_0^t E_p dt + K_p * K_D (dE / dt) \quad (\text{Ecuación. 02})$$

Los principios de cada acción de control son los siguientes:

Proporcional: se encarga de la magnitud del error.

Integral: trabaja en función del tiempo que dura el error.

Derivativo: se anticipa a las variaciones del error.

#### **2.3.4. Lazos de control**

Los diagramas de instrumentación de proceso, o tubería y diagramas de instrumentación (PID), son un buen medio de información acerca de sistemas de proceso. PID proveen una gran distribución de información incluyen la identificación de todas las variables del proceso en el sistema, una descripción de cada lazo en el sistema, e información acerca de cada instrumento en los lazos. Por lo tanto, un PID provee una pintura completa del proceso e instrumentación asociada.

Un diagrama de lazo provee una vista más detallada de un lazo de instrumentos de un proceso y permite un mejor entendimiento de la operación del lazo. El arreglo de los instrumentos está indicado en el diagrama. Esta información permite que usted identifique las conexiones entre los aparatos, los componentes de acción, y los caminos de comunicación. Además, en algunos

diagramas de lazo, las especificaciones dadas por la medida y control de hardware proveen un medio relativamente simple de determinados requerimientos cuando es necesario ordenar partes de reemplazo para el sistema

### **2.3.5. Transmisores**

Los transmisores son instrumentos que captan la variable del proceso y la transmiten a distancia a otro instrumento receptor que puede ser un indicador, registrador, controlador o una combinación de estos.

Existen varios tipos de señales de transmisión: neumáticas, electrónicas, digitales, hidráulicas.

Los transmisores neumáticos generan una señal neumática normalizada de 3-15 psi (libras por pulgada cuadrada).

Los transmisores electrónicos emplean la señal normalizada de 4-20 mA, se puede usar a distancias de 200 m hasta 1 km, todavía pueden encontrarse transmisores que envían señales de 1-5 V, 10-50 mV, 1-5 mA, 0-20 mA, utilizados antes de la normalización de 4-20 mA.

La señal 4-20 mA al ser continua y no alterna elimina la posibilidad de captar ruido, está libre de corrientes parásitas, emplea solo dos hilos que no necesitan blindaje. La relación 4-20 es la misma que la relación 3-15 y el nivel mínimo seleccionado de 4 mA elimina el problema de corrientes residuales al desconectar circuitos electrónicos y además permite detectar una avería por corte de un hilo.

El microprocesador se utiliza en los transmisores por las ventajas de rapidez de cálculo, pequeño tamaño, confiabilidad, precio cada vez más competitivo y por ser capaz de realizar cálculos adicionales dentro del propio transmisor.

Los controladores reciben las señales procedentes de los transmisores las indica y/o registra. Los controladores envían otra señal de salida, normalmente de 3-15 psi en señal neumática, o 4-20 mA en señal eléctrica de corriente. Esta señal de salida actúa sobre el elemento final de control.

El elemento final de control él es que recibe la señal del controlador y modifica la variable que está bajo el control, puede ser una válvula, un servomotor, un cilindro, etcétera.

Los posicionadores controlan movimiento del vástago y lo colocan donde el controlador dice. Fundamental es un control fino. Enemigos de la fricción y desgaste. Dan mejor cierre rápidos. Retroalimentación del vástago para lograr su correcta operación.

### **2.3.6. Control de cascada**

Un control en cascada utiliza dos lazos de control: un lazo maestro y un lazo esclavo.

El lazo maestro contiene el controlador maestro y el lazo esclavo contiene el controlador esclavo.

La salida del controlador maestro está conectada a la entrada del *set point* del controlador esclavo, causando que los dos controladores estén en cascada.

El principal objetivo de un control en cascada es eliminar o minimizar las perturbaciones que afectan la variable manipulada antes que causen cambios en el proceso.



### 3. DISEÑO METODOLÓGICO

#### 3.1. Variables

Las variables de medición determinadas para la automatización son: nivel del domo, presión del hogar, presión de vapor, flujo de alimentación de aire, flujo de egreso de gases y flujo de alimentación del combustible.

Tabla I. Variables de la caldera acuotubular

VARIABLE	DIMENSIONALES	VARIABLE INDEPENDIENTE	VARIABLE DEPENDIENTE	VARIABLE MONITOREABLE	VARIABLE NO MONITOREABLE
Nivel del domo	PSI		X	X	
Presión del Hogar	PSIG	X		X	
Presión de Vapor	PSIG	X		X	
Flujo de alimentación de aire (tiro forzado)	Porcentaje de apertura del damper		X	X	
Flujo de egreso de gases (tiro inducido)			X	X	
Flujo de alimentación de combustible	Porcentaje de apertura de la compuerta		X	X	
Costos de Automatización	Quetzales (Q)		X	X	

Fuente: elaboración propia.

#### 3.2. Delimitación de campo de estudio

El campo de estudio del presente trabajado de graduación es:

- Área: Ingeniería y Tecnología
- Área temática principal: Ciencia y Tecnología
- Área temática secundaria: Ingeniería y Tecnología Química
- Línea de investigación: Transferencia de Calor
- Eje temático de investigación: Transferencia de Calor

### **3.3. Recursos humanos disponibles**

Investigador: responsable de la realización, implementación y desarrollo de automatización. Estudiante Lenin Rolando Velásquez Rosales

Asesor: profesional que apoya con la validación y aprobación del desarrollo del trabajo. Ing. David Ricardo Cerezo

Revisor: profesional de la Escuela de Ingeniería Química que revisa y aprueba el trabajo de graduación. Ing. Manuel Tay.

Recursos humanos de operación en planta: personal que opera la caldera.

### **3.4. Recursos materiales disponibles (equipo, cristalería, reactivos)**

La caldera acuatubular cuenta con los siguientes equipos:

- Manómetro de Bourdon para medir la presión de vapor.
- Termocopla tipo J como elemento primario así como su indicador en las siguientes posiciones:
- Lazo de control del domo: temperatura de los gases de combustión antes del economizador y después del economizador así como también la del ingreso del agua de alimentación al tambor de vapor.

- Lazo de control de combustión: temperatura previo al ingreso del ingreso del aire forzado.
- Presión de vapor: temperatura de la presión de vapor.

### **3.5. Técnica cualitativa o cuantitativa**

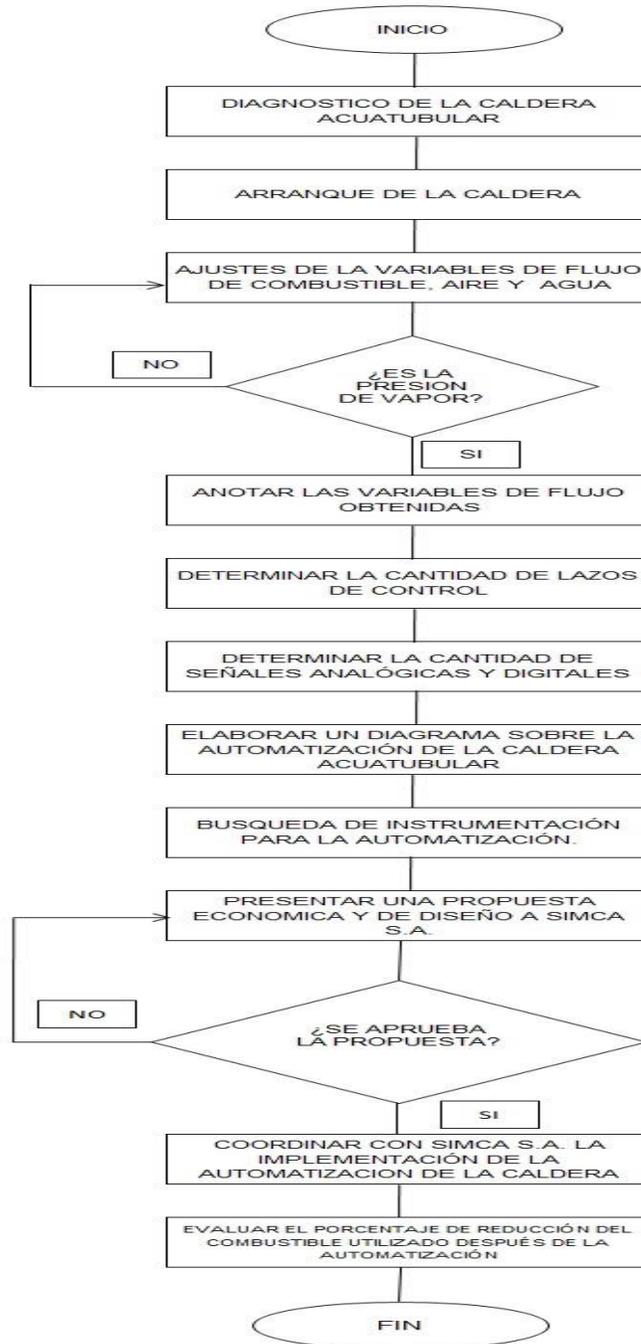
Las variables a considerar para la técnica cuantitativa son las siguientes:

- Presión de vapor
- Presión del hogar
- Presión diferencial del domo
- Apertura o cierre de *dampers* forzado e inducido

### **3.6. Recolección y ordenamiento de la información**

Se realizó un diagnóstico previo sobre el funcionamiento de la caldera acuatubular, basado en ello se determinó de forma estable las variables de proceso para evaluar su funcionamiento y establecer finalmente la propuesta de automatización más apropiada a la operación.

Figura 7. **Recolección y ordenamiento sobre la información de la caldera acuatubular**



Fuente: elaboración propia.

### 3.7. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información

La información obtenida a través del diagnóstico realizado a la caldera acuatubular se presenta a continuación:

- ¿Cuál es la producción de vapor de la caldera en toneladas de vapor/hora? 12 toneladas por hora.
- ¿Cuál es la temperatura y presión de vapor? 21 bares y 235 grados Celsius.
- ¿Cuál es el diámetro del tubo de alimentación del agua? 3 pulgadas
- ¿Cuál es el diámetro del tubo de salida de vapor de la caldera? 6 pulgadas.
- ¿Cuál es la cantidad de alimentadores de combustible que deben ser controlados? Son dos alimentadores y deben de ser controlados al mismo tiempo.
- ¿Cuál es el tipo de accionamiento de los alimentadores de combustible (motor eléctrico, variador electromagnético, hidráulico, etcétera)? Motores eléctricos de 1,5 kw y de 440 voltios.
- ¿Cuál es el tipo de accionamiento de los *dampers* forzado e inducido? Los *dampers* forzado e inducido no tienen control se usan de forma manual.

- ¿Cuántos tipos de combustibles quema la caldera? Únicamente biomasa, bagazo de raquis y coquito de palma africana que son subproductos en la extracción de aceite de palma africana.
- ¿Cuál es la presión del agua de alimentación de la caldera? 25 bares.
- ¿Cuál es el tipo y cantidad de monitoreos de presión y temperatura necesarios? La caldera contiene un manómetro de presión de vapor y termocopla tipo J en diferentes posiciones de la caldera.
- ¿Es necesario limpieza automática de parrillas? ¿Cuántos puntos de limpieza existen en la caldera? No se realiza limpieza automática, no se considera necesario.
- ¿Es necesario controlar el soplador de hollín? ¿Cuántos sopladores deben tener limpieza automática? La caldera acuatubular no tiene sopladores por lo cual no se controlan.
- ¿Es necesario controlar los reductores de presión? No tiene reductores de presión por lo cual no se controlan.

### **3.8. Análisis estadístico**

En base a la presión de vapor y la presión del hogar que son las variables dependientes se definieron la cantidad de lazos a considerar dentro de la automatización. Con base en la cantidad de lazos se determinó el control lógico programable adecuado a la aplicación (CD600Plus).

Estas variables ejecutan un control PID (proporcional, integral y derivativo) sobre diferentes instrumentos en donde buscan obtener el *set point* definido para la variable.



## **4. RESULTADOS**

### **4.1. Diagnóstico de la caldera**

La caldera acuatubular es una caldera con capacidad máxima de: 21 psig de presión la cual es fundamental para todos los procesos dentro de la planta de producción. La caldera se utiliza de forma manual y únicamente cuenta con un manómetro de Bourdon, *dampers* forzado e inducido de forma manual y termómetros como elementos primarios y sus indicadores.

### **4.2. Cantidad de lazos de control**

La cantidad de lazos determinados para la automatización de la caldera son:

- Control de nivel del domo de la caldera
- Control de combustión de la caldera

### **4.3. Cantidad de señales analógicas y digitales**

Las señales analógicas propuestas son las siguientes:

Tabla II. **Cantidad de señales analógicas**

Señales	Cantidad	Analógica
Entradas	1	Nivel del domo
	1	Presión del hogar
	1	Presión de vapor
Salidas	1	Válvula de control de nivel del domo.
	1	Posicionador del dámper forzado
	1	Posicionador del dámper inducido
	1	Posicionador de la compuerta de alimentación de combustible de bagazo de raquis y coquito de palma.

Fuente: elaboración propia.

Las señales digitales propuestas son las siguientes:

Tabla III. **Cantidad de señales digitales**

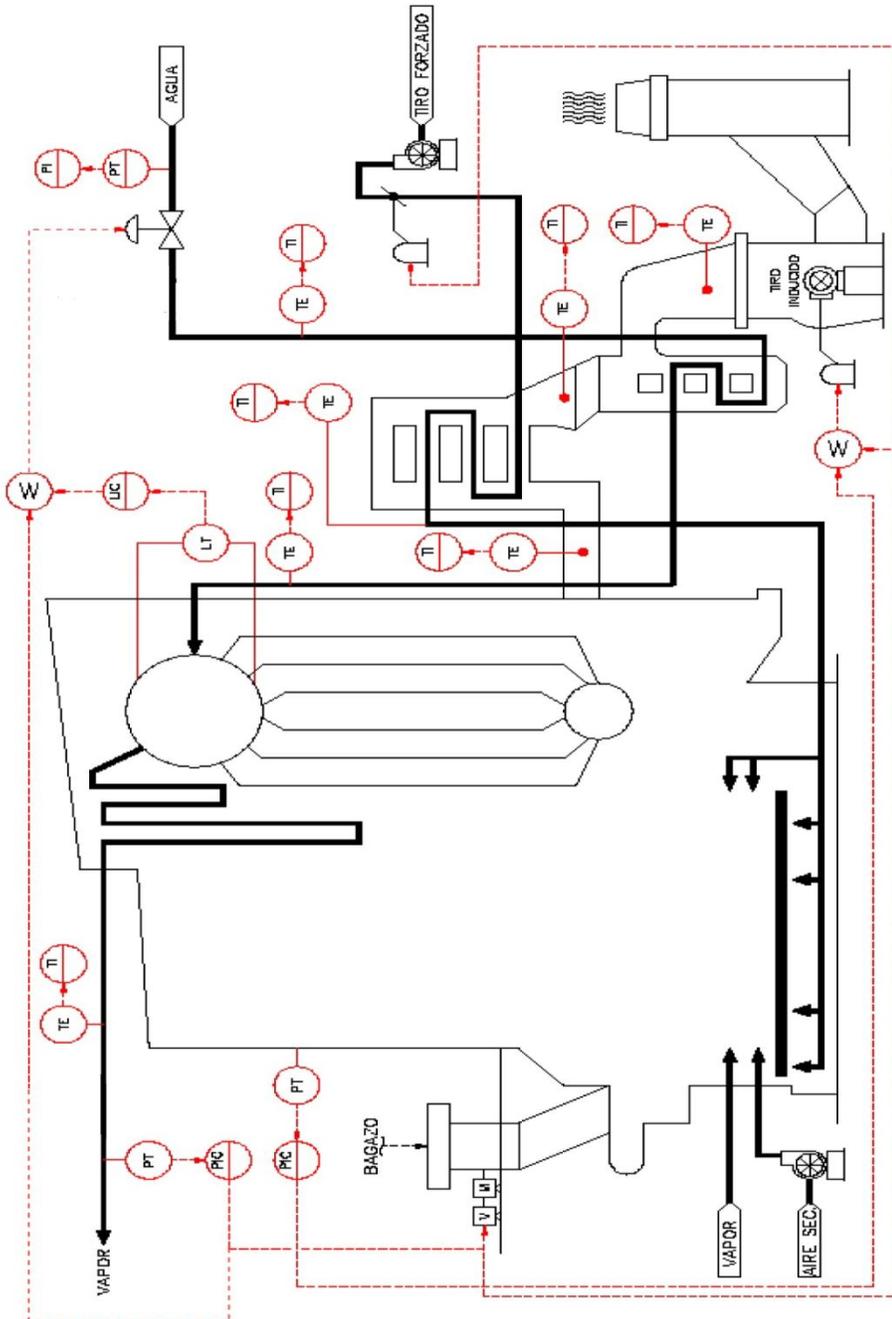
Señales	Cantidad	Digitales
Entradas	1	Indicador de encendido de bomba 1 de alimentación de agua.
	1	Indicador de encendido motor ventilador inducido.
	1	Indicador de encendido motor ventilador forzado.
	1	Temperatura antes del economizador
	1	Temperatura después del economizador.

Fuente: elaboración propia.

#### **4.4. Diagrama de lazos de control**

Se definieron dos lazos: control de nivel del domo y control de combustión. Los lazos se interconectaron al CD600Plus el cual recibe las señales de medición en cada uno de los lazos, para posteriormente de acuerdo al control proporcional, integral y derivativo que fue establecido en el CD600Plus se realizan las acciones sobre los instrumentos de cada uno de los lazos.

Figura 8. Diagrama de lazos de la caldera acuotubular



Fuente: elaboración propia, Microsoft Excel 2007.

#### 4.5. Propuesta económica a SIMCA

La propuesta fue basada en una cotización, se agrupó en tres partes: el hardware del sistema de control, la instrumentación del lazo de control del nivel del domo y la instrumentación del lazo de control de combustión.

Tabla IV. Cotización presentado a SIMCA

No.	Descripción	Cantidad	Precio Unitario (USD)	Total (USD)
1	Sistema de control del domo y combustión de la caldera acuatubular. Controlador multilazo digital plus CD600Plus	1	1,547.80	1,547.80
2	Interfase convertidor EIA 232 / EIA 485	1	630.00	630.00
3	Computador marca dell con requerimientos necesarios para visualizar y controlar el sistema	1	550.00	550.00
<b>Subtotal de hardware del sistema de control</b>				<b>2,227.80</b>

Continuación de la tabla IV.

4	<p>Gabinete de control          Fabricante: Carthom's          Estructura en acero carbono de 1.9 mm          Perfil de agujeros cuadrados (9.5 mm) y circular (4 mm) para tornillos M5/M6.          Protección: IP55          Pintura externa: Gris RAL7032          Pintura de la placa de ensamblaje: Naranja Munsell 2.5 YR 6/14          Pintura de la estructura de fondo: Negro RAL9011          Dimensiones: 300 x 500 x 460 mm          Para instalaciones en áreas no clasificadas.          Borneras para todas las entradas y salidas.          Reles para todas las salidas discretas (250 VCA y 10ª máximo) / fusibles para todas las entradas analógicas.</p>	1	5,536.0	5,536.0
5	<p>Fuente de poder – 24VDC y 5 A, modelo: Trio-PS / 1AC / 24 DC / 5 Phoenix contac o similar</p>	1	348.75	348.75
<b>Subtotal de gabinetes y paneles del sistema</b>				<b>5,884.75</b>

Continuación de la tabla IV.

6	Control de nivel del domo Transmisor de presión diferencial LD301D-211 Rango: 1.67 a 200 pulgadas de agua Material de diafragma con aceite de silicone.	1	645	645
8	Posicionador inteligente para válvula de globo. FY301-11 Protocolo: Hart de 4 a 20 mA	1	719	719
<b>Subtotal sobre el control de nivel del domo</b>				<b>1,364.00</b>
9	Control de combustión Transmisor inteligente de presión LD301M-511 Rango: 30 a 3600 psi Material de diafragma con aceite de silicone Presión de vapor y presión del hogar.	2	656.13	1,312.26
10	Posicionador inteligente. FY301- 11 Protocolo: Hart de 4 a 20 mA	3	719	2,157.00
<b>Subtotal sobre el control de combustión</b>				<b>3469.26</b>
<b>Total</b>				<b>12,945.81</b>

Fuente: Cotización DI 672/2013 Smar, p. 1-3.

#### 4.6. Coordinación con SIMCA la implementación del sistema de control automático

La implementación del control de automático con SIMCA se ha realizado de la siguiente forma:

Tabla V. Coordinación de la implementación con SIMCA

No .	ACTIVIDAD	RESPONSABLE	AÑO 2013											
			E	F	M	A	M	J	J	A	S			
1	Elaboración del presupuesto de automatización del proyecto.	Investigador		X										
2	Aprobación del presupuesto de automatización del proyecto	Industria						X						
3	Compra de instrumentos	Industria							X					
4	Implementación de automatización	SIMCA										X		
5	Toma de información, Presión de Vapor, Combustible, Aire y Agua	Investigador												X

Fuente: elaboración propia.

#### 4.7. Porcentaje de reducción de combustible

Actualmente se ha mantenido la cantidad de combustible de ingreso, pero bajo las condiciones actuales de uso la automatización mejoró la eficiencia de la caldera considerando los siguientes datos:

Tabla VI. **Comparativo previo y después a la automatización**

Variable	Previo a la automatización	Posterior a la automatización
Horas operadas (h)	309	196
Potencia generada (kw)	46,777	69,877
Energía (kw/h)	151	357
Diferencia en horas (Posterior – previo a automatización)		206

Fuente: elaboración propia.

La automatización ahorró 206 kw/h y considerando que USD 160 vale 01 MW actualmente la caldera lleva generando un ahorro de Q 51 681 (considerando una tasa de cambio de 1 USD igual a Q. 8,00) que equivale a un 49,90 % del precio del proyecto.



## 5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

En este estudio el propósito primordial fue abordar la automatización de la caldera acuatubular en búsqueda de mejorar la forma de operación de la caldera, considerando a la vez la seguridad industrial como base primaria para la operación de la misma.

En los antecedentes, el numeral uno de este trabajo de graduación muestran que la automatización bien diseñada e implementada aporta mediciones más exactas, controles que antes no se verificaban y permite a la vez que se pueda reducir costos de operación y mantenimiento.

La automatización de la caldera acuatubular partió básicamente sobre conocer la presión de vapor requerida para poder iniciar con el desarrollo del sistema automático. Se definieron dos lazos de control que fueron el lazo del nivel del domo y el lazo de control de combustión de la caldera. Cada uno fue diseñado para posteriormente integrarlo en un controlador multilazo digital plus CD600Plus, el cual maneja y controla las diferentes operaciones del nivel del domo y control de la combustión de la caldera.

El lazo del nivel del domo está integrado por el transmisor de presión diferencial LD301D-211, el cual a través de una célula capacitiva logra convertir la deflexión sufrida por el sensor de diafragma en un diferencial de presión. El resultado de la medición de presión se presenta en el controlador indicador de nivel para finalmente enviar una señal eléctrica de 4 a 20 mA al CD600Plus.

El lazo también está integrado por el transmisor de presión de vapor el cual lo presenta en su controlador indicador de presión para finalmente enviar una señal de 4 a 20 mA al CD600Plus. Si la presión de vapor no es la requerida de acuerdo al *setpoint* definido, el CD600Plus envía una señal al posicionador de la válvula (FY301) el cual de acuerdo a la señal recibida de 4 a 20 mA comanda al actuador para aperturar de forma exacta la válvula hasta el nivel que se requiera. El agua de alimentación se conduce a través de un economizador que básicamente es una parte de la caldera donde existe un intercambio de calor entre los gases de combustión que está saliendo con el agua que se está ingresando. Este incremento de temperatura en el agua se realiza para economizar combustible en el proceso de producir vapor así como también para minimizar el impacto ambiental, ya que se evita el aumento de la temperatura del medio ambiente.

El ingreso del agua al tambor de vapor se detiene cuando se ha llegado a la presión de vapor requerida, para lo cual el CD600Plus envía la señal al posicionador de la válvula (FY-301) para que a través del actuador se cierre por completo la válvula.

La circulación del agua de alimentación dentro del domo se realiza de forma natural, es decir que a través de las diferencias de densidades el agua caliente se coloca hasta arriba en el domo, en donde cuando va alcanzando su punto de ebullición, pequeñas burbujas de vapor se forman sobre la superficie calentada para posteriormente vencer la tensión y convertirse en vapor.

El lazo de control de combustión se fundamenta en que el CD600Plus recibe la señal de la presión de vapor (LD301M-511) así como también la presión del hogar (LD301M-511) de la caldera para que en función de esas mediciones actúa sobre los siguientes posicionadores. Cuando la presión de

vapor y presión del hogar está por debajo del *setpoint* definido el CD600Plus traslada tres señales eléctricas de 4 a 20 mA para comandar la compuerta de la tolva de biomasa buscando agregar más biomasa, de igual forma traslada una señal para el posicionador de tiro inducido y otra para el posicionador de tiro forzado.

Los tres posicionador que reciben la señal de 4 a 20 mA son un FY-301 que realizar un control de movimientos tipo lineal, ya que a través de la señal eléctrica recibida y convirtiéndola a una señal neumática se actúa sobre los actuadores tipo pistón. Las señales son calibradas de acuerdo a los conceptos básicos, es decir desde cerrado, 25 % de apertura, 50 de apertura, 75 % de apertura y totalmente abierta. Esto permite que se obtengan las acciones necesarias para lograr más eficientemente y fácilmente la presión de vapor y hogar necesarias para suministrar lo requerido.



## CONCLUSIONES

1. La realización sobre la automatización de una caldera acuatubular con alimentación de bagazo de raquis y coquito de palma africana se logra a través de dos lazos de control; el nivel del domo de vapor y el control de la combustión.
2. La automatización realizada sobre la caldera acuatubular con alimentación de bagazo de raquis y coquito de palma africana hizo más eficiente a la caldera, presentando un ahorro de 206 kw/h equivalente a Q 51 681,00.
3. El CD600Plus es un eficiente PLC para controlar y manejar el lazo de control del domo de vapor y el lazo de combustión para una caldera acuatubular con alimentación de bagazo de raquis y coquito de palma africana.
4. La mejora en la eficiencia de la caldera se fundamentó a través del control de la presión del hogar, su alimentación de biomasa y su sintonización respecto a la apertura y cierre de los tiros forzado e inducido.
5. Se diseñaron e implementaron 7 señales analógicas y 5 señales digitales para la automatización de la caldera acuatubular de bagazo de raquis y coquito de palma africana.

6. Se presentó a Sistemas Industriales Modernos de Centro América, S.A. el diseño y propuesta económica para la automatización de la caldera acuatubular. La propuesta económica tuvo un valor de USD 12,945.81 y la implementación del diseño tuvo una duración de 1 mes.

## RECOMENDACIONES

1. El tiro forzado e inducido se controlaron a través del posicionador FY301, otra opción a evaluar para mejorar la eficiencia de la caldera podría realizarse a través de variadores de velocidad en los ventiladores.
2. Evaluar la compatibilidad del protocolo de comunicación (Hart) de los instrumentos con otros protocolos para la compra de repuestos.
3. Evaluar la automatización del desaireador del agua de alimentación para mejorar la eficiencia de la caldera.



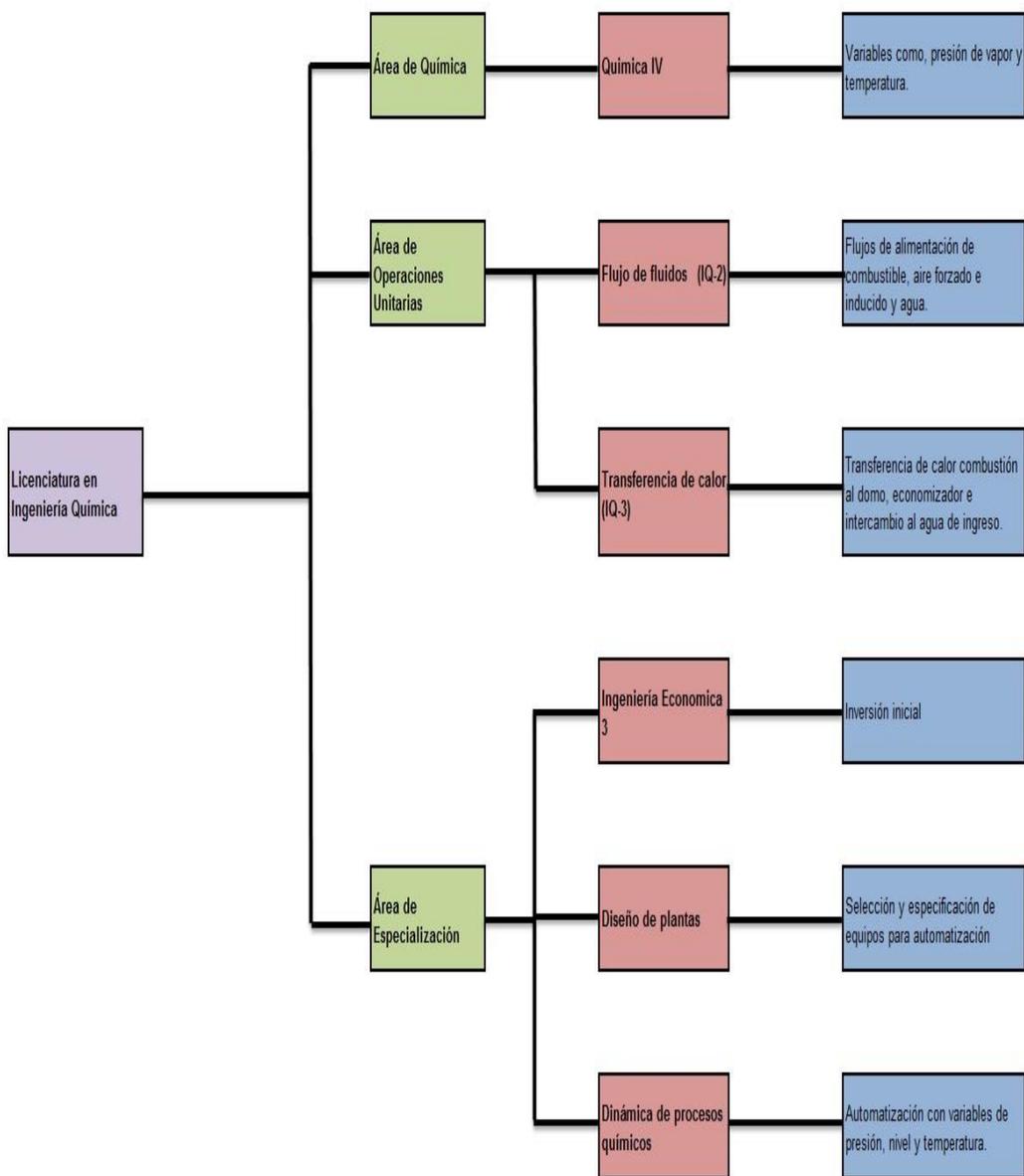
## BIBLIOGRAFÍA

1. ATIGUA – ISA CENTRAL GUATEMALA. *Introducción al estudio de Caldera*. IV Diplomado en Instrumentación y control automático de procesos industriales. Guatemala, 2007. 3 p.
2. \_\_\_\_\_. *Control de aire y combustible para seguridad y eficiencia*. IV Diplomado en Instrumentación y control automático de procesos industriales. Guatemala, 2007. 5 p.
3. CERESO TOLEDO, David. *Propuesta de una práctica experimental de control automático del proceso de transferencia de calor, en el intercambiador de tubos concéntricos del laboratorio de operaciones unitarias en la universidad de San Carlos de Guatemala*. Trabajo de graduación de Ing. Química. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2005. 172 p.
4. CHAN COYOY, Everardo. *Diseño de operación de una planta termoeléctrica en un ingenio azucarero*. Trabajo de graduación de Ing. Química. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2003. 13 p.
5. PERRY, Robert; GREEN, Don. *Manual del ingeniero químico*. 7a ed. Volumen I. España: McGraw-Hill, 2001. 35 p.
6. \_\_\_\_\_. *Reglamentos de calderas y generadores de vapor*. Reglamento Supremo No. 48. República de Chile, 1948. 3 p.

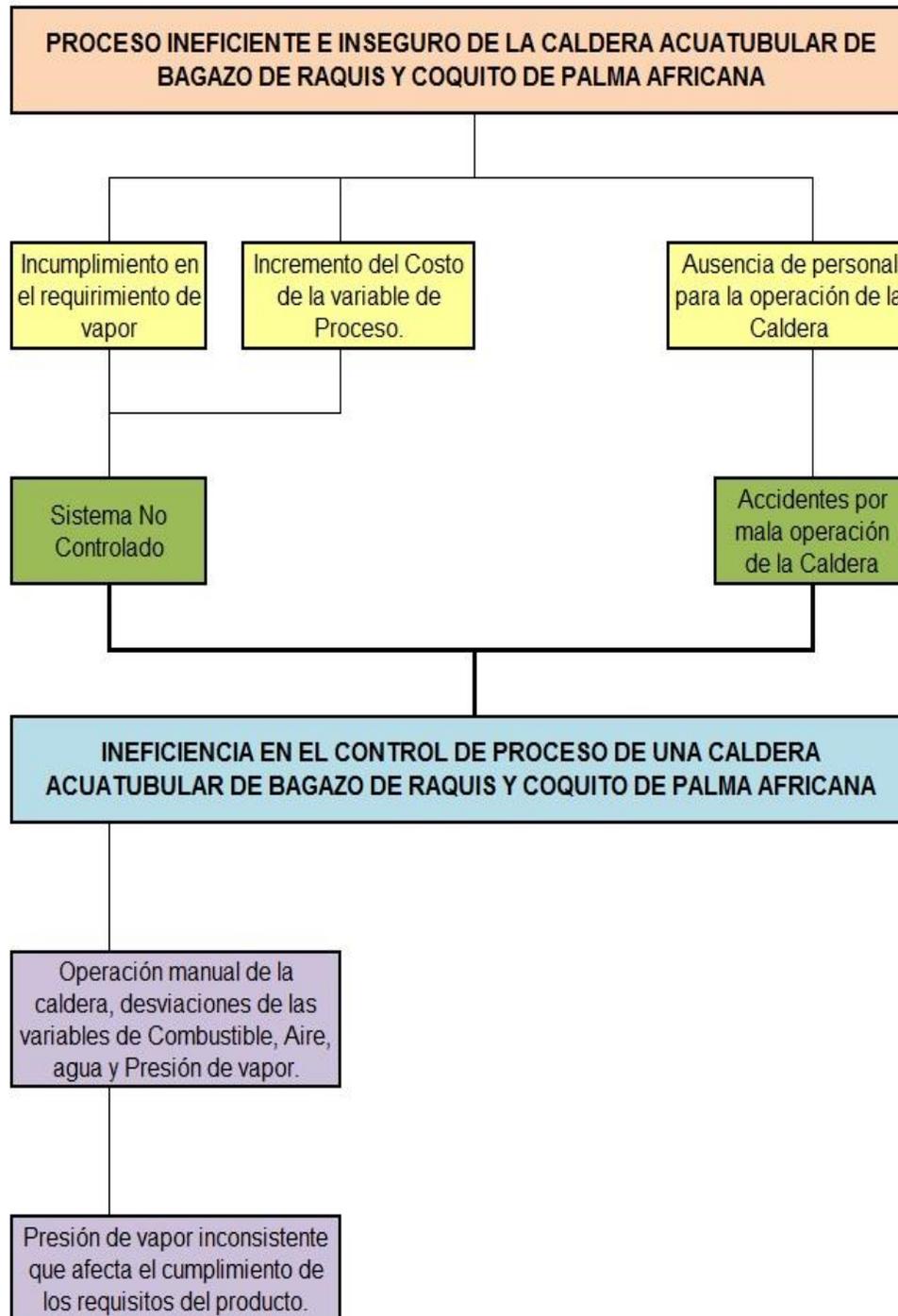
7. VALLE ESTEVEZ, Fredy. *Documentación de procedimientos y operación de una caldera acuotubular de 225,000 lb-vapor/hr en un ingenio azucarero (Ingenio Magdalena S. A.)*. Trabajo de graduación de Ing. Mecánica. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2003. 47 p.

# APÉNDICE

## APÉNDICE 1: TABLA DE REQUISITOS ACADÉMICOS



## APÉNDICE 2: DIAGRAMA DE ISHIKAWA O ÁRBOL DE PROBLEMAS



Fuente: elaboración propia.

## ANEXOS

Las características de los instrumentos de campo para automatización son los siguientes:

LD301D-211-BU10-011/I1/PO – Nivel del domo

LD301D : Intelligent differential pressure transmitter.

2 : Range: 1.67 to 200 inH2O

1 : Diaphragm material and fill fluid: 316L SST – Silicone oil

1 : Flanges, adapters and drain / vent valves material : CF 8M / 316 SST

B : Wetted o-rings material : Buna N

U : Drain / Vent position: Top

1 : Local indicator: with digital indicator

0 : Process connection: 1/4 – 18 NPT (Without adapter)

0 : Electrical connection: 1/2 – 1/4 NPT

1 : With local adjustment: with local adjustment

1: Mounting Bracket: Carbon steel bracket

I1 : Identification plate: FM – Factory mutual

PO: Painting: gray munsell N 6,5

LD301M-511-BU10-011/I1/PO – Presión de vapor y presión del hogar

LD301M : Intelligent gage pressure transmitter.

5 : Range: 30 to 3600 psi

1 : Diaphragm material and fill fluid: 316L SST – Silicone oil

1 : Flanges, adapters and drain / vent valves material : CF 8M / 316 SST

B : Wetted o-rings material : Buna N

U : Drain / Vent position: Top

1 : Local indicator: with digital indicator

0 : Process connection: 1/4 – 18 NPT (Without adapter)

0 : Electrical connection: 1/2 – 1/4 NPT

1 : With local adjustment: with local adjustment

1: Mounting Bracket: Carbon steel bracket

I1 : Identification plate: FM – Factory mutual

PO: Painting: gray munsell N 6,5

Fuente: Cotización DI 672/2013 Smar, p. 1-3.