



**UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ**

**AUTOMATIZACIÓN DEL PROCESO DE  
COGENERACIÓN DE VAPOR EN LA  
CALDERA N° 7 DE PAPELES  
VENEZOLANOS C.A.**

**Autor:** Angel Leon

Urb. Yuma II, calle N° 3. Municipio San Diego  
Teléfono: (0241) 8714240 (master) – Fax: (0241) 8712394



**REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA  
UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA**

**AUTOMATIZACIÓN DEL PROCESO DE COGENERACIÓN DE VAPOR EN  
LA CALDERA N° 7 DE PAPELES VENEZOLANOS C.A.**

**Proyecto de trabajo de grado para optar al título de  
INGENIERO ELECTRÓNICO**

**Autor:** Angel Leon

CI: 27.097.479

**Tutor:** Ing. Raniere Alezones

CI: 8.843.809

San Diego, mayo de 2019



FI-E -002-2019-2CE

Valencia, 19 de Julio de 2019

Ciudadanos:  
Ángel León  
C.I: 27.097.479  
Presente-

Cumplo con informarle que la Comisión de Trabajo de Grado y Pasantías de la Facultad de Ingeniería en su reunión N° 01-2019 de fecha 19-07-2019 aprobó el proyecto de trabajo de grado titulado **AUTOMATIZACIÓN DEL PROCESO DE COGENERACIÓN DE VAPOR EN LA CALDERA N°7 DE PAPELES VENEZOLANOS C.A** Presentado por usted como requisitos para optar al título de Ingeniero Electrónico.

Se ratifica la designación del Ing. Raniera Alezones C.I: 8.843.809 y la Ing. Alicia De Pizzela C.I: 4.598.880 como Tutores Académicos y Metodológicos que los asesoraran en el desarrollo de este proyecto.

Atentamente,

Prof. Luis Lira

Decano de la Facultad de Ingeniería



e.c. Coordinación de Pasantías y Trabajo de Grado (1).

L/lc

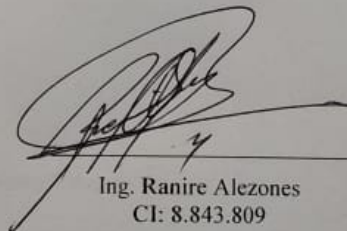


REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA  
UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

#### ACEPTACIÓN DEL TUTOR

Quien suscribe, Ingeniero Ranire Jose Alezones Ruiz, titular de la cedula de identidad N° 8.843.809, en mi carácter de tutor del trabajo de grado presentado por el ciudadano Angel Daniel Leon Galea, titular de la cedula de identidad N° 27.097.479, titulado "AUTOMATIZACIÓN DEL PROCESO DE COGENERACIÓN DE VAPOR EN LA CALDERA N° 7 DE PAPELES VENEZOLANOS C.A.". Presentado como requisito parcial para optar al título de ingeniero en Electrónica, considero que dicho trabajo reúne los requisitos y méritos suficientes para ser sometido a la presentación pública y evaluación por parte del jurado examinador que se designe.

En San Diego, a los 08 días del mes de Octubre del año 2019



Ing. Ranire Alezones  
CI: 8.843.809

## ÍNDICE GENERAL

CONTENIDO	Pág
ÍNDICE DE CUADROS.....	viii
ÍNDICE DE GRÁFICOS.....	viii
ÍNCIDE DE FIGURAS.....	ix
RESUMEN.....	xi
INTRODUCCIÓN .....	1
<b>CAPÍTULO</b>	
<b>I EL PROBLEMA</b>	
1.1. Planteamiento del Problema.....	3
1.2. Formulación del Problema .....	8
1.3. Objetivos de la Investigación .....	8
1.3.1. Objetivo General.....	8
1.3.2. Objetivos Específicos.....	8
1.4. Justificación.....	8
1.5. Limitaciones .....	9
1.6. Alcance.....	9
<b>II MARCO TEÓRICO</b>	
2.1. Antecedentes de la Investigación .....	10
2.1.1. Investigación Nacional.....	10
2.1.2. Investigaciones Internacionales .....	10
2.2. Bases Teóricas.....	12
2.2.1. Generación de Vapor .....	12
2.2.2. Calderas Industriales.....	13
2.2.3. Caldera de Recuperación .....	17
2.2.4. Instrumentación Industrial .....	19
2.2.5. Automatización Industrial.....	26
2.3. Bases Legales .....	27
2.4. Definición de Términos Básicos .....	28

### **III MARCO METODOLÓGICO**

3.1. Modalidad de la Investigación .....	30
3.2. Diseño de la Investigación .....	30
3.3. Nivel de la Investigación.....	31
3.4. Población y Muestra.....	31
3.5. Técnicas e Instrumentos de Recolección de Información .....	31
3.5.1. Descripción de Técnicas e Instrumentos.....	32
3.6. Fases Metodológicas de la Investigación .....	33

### **IV RESULTADOS**

4.1. Fase I: Diagnóstico de la situación actual presente en el proceso de cogeneración de vapor en la caldera N° 7 de Papeles Venezolanos C.A. ....	35
4.1.1. Proceso de Producción de Vapor en la caldera N° 7 de Papeles Venezolanos C.A. ....	35
4.1.2. Situación Actual en la Caldera N° 7 .....	38
4.1.3. Identificación de los Puntos Críticos .....	39
4.2. Fase II: Evaluación de los puntos críticos del proceso de cogeneración de vapor en la caldera N° 7 de Papeles Venezolanos C.A. ....	41
4.2.1. Falta de Instrumentos de Registro.....	41
4.2.2. Automatización del Proceso de Cogeneración de Vapor.....	42
4.3. Fase III: Diseño de la automatización del proceso de cogeneración de vapor en la caldera N° 7 de Papeles Venezolanos C.A. ....	48
4.3.1. Lazo de Control de Nivel de Agua .....	49
4.3.2. Lazo de Control de Producción de Vapor.....	50
4.3.3. Diseño del Proceso de Control.....	54
4.4. Fase IV: Estudio de Factibilidad Ambiental, Social y Económica. ....	64
4.4.1. Estudio de Factibilidad Ambiental.....	64
4.4.2. Estudio de Factibilidad Social .....	65
4.4.3. Estudio de Factibilidad Económica .....	66

**V CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

5.1. Conclusiones ..... 68

5.2. Recomendaciones ..... 69

**REFERENCIAS ..... 70**

## ÍNDICE DE CUADROS

<b>CUADROS</b>	<b>Pág</b>
1 Transmisores.....	55
2 Presupuesto inversión inicial.....	67

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

<b>GRAFICOS</b>	<b>Pág</b>
1 Calidad del vapor (media mensual).....	7
2 Comportamiento del transmisor de presión P/I.....	51
3 Convertidor I/P.....	52
4 Comportamiento del Damper by-pass.....	52

## ÍNCIDE DE FIGURAS

<b>FIGURAS</b>	<b>Pág</b>
1 Cogeneración.....	6
2 Instrumento de registro fuera de servicio.....	7
3 Caldera acuotubular.....	14
4 Caldera pirotubular.....	15
5 Caldera pirotubular de agua caliente.....	16
6 Caldera acuotubular fluido térmico.....	16
7 Caldera pirotubular de vapor.....	17
8 Caldera de recuperación de calor vertical.....	19
9 Componentes de instrumentación.....	20
10 Sensor infrarrojo digital.....	21
11 Transmisor SIEMENS.....	21
12 Rango de un termómetro.....	22
13 Error (termómetro común-patrón).....	22
14 Precisión-Exactitud.....	23
15 Control PID.....	25
16 Posicionador Bailey.....	36
17 ABB Taylor Mod30.....	37
18 ABB Taylor Mod30.....	37
19 PC-30 ABB.....	39
20 Transmisor de posición del damper de by-pass.....	40
21 Medidores de temperatura RTD.....	40
22 ControlLogix 5580 de Allen-Bradley.....	48
23 Diagrama de Control de nivel de agua.....	49
24 Diagrama del proceso de control.....	54
25 Elemento final de control.....	55
26 Convertidor I/P.....	55

<b>FIGURAS</b>	<b>Pág</b>
27 Rutinas y Subrutinas del sistema de control .....	57
28 Módulos del sistema de control.....	57
29 Rutina Principal.....	58
30 Subrutina Protección de motores.....	59
31 . Subrutina Condiciones de Inicio.....	59
32 Subrutina de Apertura de los dampers de aislamiento.....	60
33 Subrutina Habilitar control.....	61
34 Subrutina Control 1.....	61
35 Subrutina de Control 2, 1/2.....	62
36 Subrutina de Control 2, 2/2.....	62
37 Pantalla principal del HMI.....	63
38 Pantalla de totalización.....	63
39 Representación de fallas en el HMI.....	64



**REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA  
UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA**

**AUTOMATIZACIÓN DEL PROCESO DE COGENERACIÓN DE VAPOR EN  
LA CALDERA N° 7 DE UNA TURBINA A GAS EN PAPELES  
VENEZOLANOS C.A.**

**Autor:** Angel Leon

**Tutor:** Ing. Raniere Alezones

**Fecha:** mayo 2019

**RESUMEN**

El objetivo principal que se plantea es proponer el control automatizado de cogeneración en la caldera de una turbina a gas, aplicado a una caldera en la empresa Papeles Venezolanos C.A., es un proyecto general y aplicable a calderas de recuperación o calentadores, con características similares. Se presenta como una investigación del tipo proyecto factible, apoyada por investigación de campo y documental, no experimental descriptiva que pretende generar una propuesta de mejora en el proceso de control de dicha caldera. Surge por la necesidad que tiene la empresa de facilitar a los trabajadores electricistas e instrumentistas, el mantenimiento de las instalaciones, equipos, autómatas y software que interviene en el proceso de automatización, ya que actualmente es un equipo ya obsoleto y por consiguiente si se daña alguno, sus repuestos son escasos en el mercado e implican un alto costo monetario obtenerlos. A través de la observación directa se buscará medir o cuantificar el nivel de instrumentación, los instrumentos a utilizar notas y consulta de información técnicamente asistida por expertos operadores de la caldera. Se quiere hacer una propuesta para automatizar globalmente todo el proceso con equipo moderno de alta tecnología. Como resultado, presentar junto a la propuesta, diagramas de proceso, líneas de código para la programación del plc y establecer la comunicación, para el envío de datos y manipulación a distancia del plc con el hmi.

**Descriptor:** Automatización, caldera de recuperación, instrumentación, control, cogeneración.

## INTRODUCCIÓN

En el presente, muchas son las empresas que se preocupan en mejorar sus procesos, así como la calidad del ambiente de trabajo que ofrecen a sus trabajadores. Todo esto con el fin de lograr mayor productividad y mayor eficiencia a un menor costo. En la industria la utilización del vapor se viene empleando desde los inicios de la industrialización, el vapor es un recurso incluso mas antiguo que la electricidad. Para lograr la producción de vapor se utilizan calderas, las cuales sobrecalientan agua o cualquier otro fluido de trabajo como el aceite, y este pasa a un estado gaseoso que circula a través de tuberías generando alta presión que se utiliza en múltiples procesos.

Las calderas hoy en día se controlan automáticamente para mantener un caudal de presión lo más estable posible. En la automatización de estos procesos se utilizan desde autómatas hasta sistemas de control integrados que relacionan todas las variables en proceso. Estos autómatas no son mas que controles dedicados destinados a un control específico de tres o cuatro variables. Ahí se encuentra la importancia de realizar el presente proyecto, donde, se quiere emplear en el control del proceso de una caldera con equipos de carácter novedoso, y tecnología actual.

El presente trabajo investigativo está limitado al control de calderas de recuperación por la dificultad que implica el control en calderas autónomas que usan directamente un combustible para mantener la llama de los calentadores o quemadores y lograr su objetivo, evaporizar el fluido de trabajo. El proyecto de investigación se estructura de acuerdo a la normativa para presentar trabajos de grado de la de la Universidad José Antonio Páez. A continuación, se detalla la distribución de los capítulos que lo conforman.

**Capítulo I:** Se planteó el problema a tratar, sus objetivos, general y específicos, su justificación, alcance y limitaciones que el mismo tuvo, a fin de conocer la

problemática a la que se pretendió dar solución y qué se pretende lograr con esta investigación.

**Capítulo II:** Para este capítulo se dan a conocer algunos trabajos que anteceden a esta investigación, las bases teóricas que lo soportan y algunos términos básicos que guardan relación con el tema y que harán más fácil su comprensión. Todo esto con el fin de soportar la investigación bajo conceptos y teorías ya establecidas.

**Capítulo III:** Está compuesto por el tipo de investigación, y las fases que se llevaron a cabo para el cumplimiento de cada uno de los objetivos específicos.

**Capítulo IV:** Se compone de los recursos que fueron necesarios para la realización del proyecto, recursos humanos, materiales, financieros y mas importante el tiempo invertido.

# **CAPÍTULO I**

## **EL PROBLEMA**

### **1.1. Planteamiento del Problema**

Existen hoy en día muchas industrias a nivel mundial encargadas de la manufactura y producción de artículos, bienes, productos, alimentos y otros. En la producción industrial intervienen una serie de procesos rigurosos y característicos de cada empresa, dichos procesos son generalmente automatizados a través de motores y máquinas con diseños específicos según su función, estas máquinas se controlan mediante lógica cableada, dispositivos electrónicos programables y actualmente Controladores Lógico Programables o Programmable Logic Controller (PLC).

Igualmente existen industrias que proveen energía eléctrica a las industrias manufactureras y de producción, para lograr arrancar y poner en funcionamiento todas sus instalaciones, este servicio que presta la industria de energía eléctrica puede suponer en ocasiones un alto costo monetario por consumo excesivo que es lo más común en una empresa de manufactura, límites de consumo y en ciertas ocasiones la calidad del servicio no es la mejor, lo que acarrea daños y fallas en las instalaciones.

Actualmente en muchas industrias venezolanas se han implementado alternativas que son consecuentes de un mal servicio por parte de las empresas distribuidoras de energía eléctrica en el estado. Dentro de estas alternativas se encuentran las centrales termoeléctricas; una central termoeléctrica es una instalación empleada en la generación de energía eléctrica a partir de la energía liberada por combustibles fósiles como petróleo, gas natural, carbón y núcleos de uranio.

Estas centrales termoeléctricas se dividen en tres tipos; centrales termoeléctricas convencionales, centrales de gas y centrales de ciclo combinado o de cogeneración. Una planta simple de cogeneración consiste en una instalación de turbina de gas mejorada, por cuanto los gases de escape de dicha turbina pasan a través de un

generador de vapor, que forma parte de un ciclo de vapor.

El generador de vapor utiliza como fuente calorífica los gases de escape de la turbina de gas, para configurar un ciclo Rankine con su turbina de vapor. Se genera electricidad con los trabajos mecánicos de la turbina de gas y la turbina de vapor. En el ciclo combinado, el generador de vapor recupera el calor residual que tienen los gases de escape de la turbina de gas, que se comporta como una caldera de recuperación, o caldera de calor residual.

En la caldera de recuperación se debe medir y controlar ciertas variables:

- Flujo de agua de entrada
- Flujo de vapor de salida
- Nivel de agua de la caldera
- Presión de vapor de salida
- Flujo de recirculación de agua

Para continuar debemos definir que es una caldera; una caldera es un dispositivo que está diseñado para generar vapor saturado. Este vapor saturado se genera a través de una transferencia de energía (en forma de calor) en la cual el fluido, originalmente en estado líquido, se calienta y cambia de estado. La transferencia de calor se efectúa mediante un proceso de combustión que ocurre en el interior de la caldera, elevando progresivamente su presión y temperatura. La presión, como se indicó al inicio, no puede aumentar de manera desmesurada, ya que debe permanecer constante por lo que se controla mediante el escape de gases de combustión, y la salida del vapor formado. Debido a que la presión del vapor generado dentro de las calderas es muy grande, estas están construidas con metales altamente resistentes a presiones altas, como el acero laminado.

Actualmente la utilización de calderas ha crecido conforme ha evolucionado el entorno industrial y el empleo de nuevas técnicas para el control de procesos, de esta manera la implementación de una caldera depende directamente del tipo de proceso, sin embargo, las calderas son eficientes y de una rápida respuesta con lo cual se garantiza un mejor desempeño en la realización de funciones u operaciones que el

proceso demande. El uso de las calderas puede ser a nivel residencial, comercial e industrial esta última toma en cuenta los tramos alimenticios, químicos, automotrices, producción de energía eléctrica entre otros.

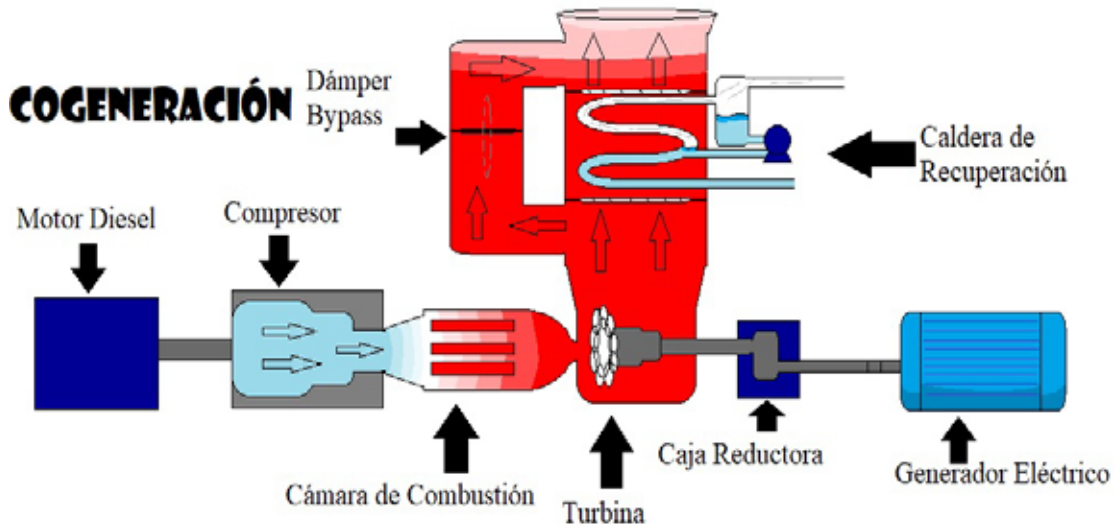
En consecuencia a ello, el uso de calderas puede generar riesgos y esto depende en gran medida de las dimensiones con las cuales pueda contar la misma, ya que el control de las variables que intervienen en el desarrollo del proceso se puede ver afectado y esto puede generar pérdidas o accidentes irreparables.

Implementar en una central termoeléctrica de cogeneración una caldera de recuperación, requiere el diseño de un sistema de control y monitoreo para garantizar el correcto funcionamiento de la caldera. Existen sistemas de control limitados a solo controlar una o dos variables de un y proceso y no todo el proceso como es lo ideal. Se requiere una interface hombre-máquina que manejará el operador encargado.

En el estado Carabobo de Venezuela, municipio Guacara, se encuentra la empresa Papeles Venezolanos C.A., dicha empresa se encarga de la producción de papel higiénico para uso cotidiano. En esta empresa existe un departamento encargado de prestar servicio a diversas áreas dentro de la misma empresa tomando en cuenta el departamento de producción. El tipo de servicio que suministra dicho departamento es la producción y distribución de energía eléctrica, así como también la producción y distribución de vapor saturado y vapor sobrecalentado, mediante turbinas generadoras y calderas.

Existen alrededor de tres calderas y tres turbinas generadoras, en estado operativo. Entre las calderas se encuentra la caldera N° 7, que se trata de una caldera de recuperación acoplada a una turbina a gas, donde se realiza un proceso de cogeneración. La cogeneración es el procedimiento mediante el cual se obtiene simultáneamente energía eléctrica y energía térmica útil (en este caso vapor saturado). Para la producción de vapor se ubica una caldera de tipo acuotubular de manera que reciba el calor producido por los gases de escape presentes en la combustión, la circulación del gas residual a través de la caldera se controla mediante un dámper de bypass, accionando su apertura y cierre de acuerdo al nivel de presión de vapor que se

necesita. En la Figura 1 se puede apreciar el procedimiento de cogeneración.

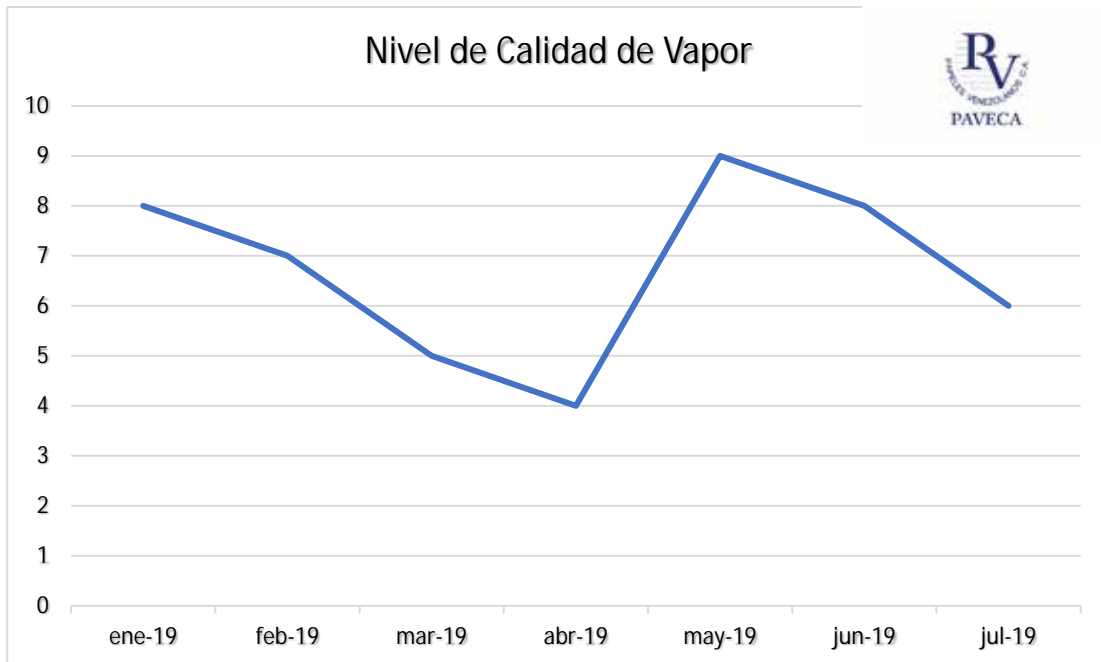


**Figura 1.** Procedimiento de cogeneración.

Fuente: Leon, A. (2019)

La principal problemática que existe en la empresa Papeles Venezolanos se puede observar en las variaciones de presión de vapor que existen y que afectan directamente al proceso de manera continua. Esta falla es imposible de cuantificar por parte del departamento de generación, ya que no existe un instrumento de registro en funcionamiento, sin embargo, el personal encargado de operar en producción, facilitó dicha información en función a la calidad de la distribución de vapor. En el gráfico 1 se muestra la media del nivel de calidad mensualmente.

Si nombramos directamente los síntomas del problema tenemos; falta de eficiencia en el control del proceso, poca facilidad para detectar problemas y fallas, el operador debe acercarse muy seguido al proceso para verificar el funcionamiento, si se desatiende por un tiempo el proceso “automatizado” pueden acarrear fallas a otros procesos dependientes. Este problema puede ser causado por una mala instrumentación, no corregir ni actualizar los equipos y aparatos correspondientes (Ver Figura 2), poca aceptación a nuevas tecnologías o falta de personal preparado en sistemas mejorados que ofrece el mercado actual.



**Gráfico 1.** Calidad del vapor (media mensual)  
**Fuente:** Papeles Venezolanos C.A. (2019)



**Figura 2.** Instrumento de registro fuera de servicio  
**Fuente:** Leon, A. (2019)

Las centrales eléctricas presentan la peculiaridad de tratarse de un proceso en serie, de forma que el fallo grave en cualquiera de sus componentes principales, normalmente de gran tamaño y sin un repuesto disponible, supone la parada total de producción de activos de elevado valor y de los que se obtiene en condiciones normales un gran beneficio bruto. Así siniestros, ya sean de daños o avería de maquinaria, en

centrales térmicas de grandes calderas pueden suponer paradas de varios meses con las implicaciones en las cuentas de resultado de los operadores y de las aseguradoras y reaseguradoras. Reducir o prevenir los siniestros en calderas en centrales de generación eléctrica representa una gran importancia dentro de una industria.

En vista de la problemática se necesitará diagnosticar los instrumentos que componen el proceso para poder detectar el problema existente; los sensores, válvulas y módulos de control deben ser sustituidos. Analizar las variables que intervienen en el proceso. Analizar con detalle posibles alternativas de instrumentación para brindar al operador un conocimiento general sobre el proceso completo, algunas variables que en él intervienen y las fallas que puedan presentarse.

## **1.2. Formulación del Problema**

¿Cómo reducir las variaciones de vapor en el proceso cogeneración, en la caldera N° 7 Papeles Venezolanos C.A.?

## **1.3. Objetivos de la Investigación**

### **1.3.1. Objetivo General**

Proponer la automatización del proceso de cogeneración de vapor en la caldera N° 7 de Papeles Venezolanos C.A.

### **1.3.2. Objetivos Específicos**

- Diagnosticar la situación actual presente en el proceso de cogeneración de vapor en la caldera N° 7 de Papeles Venezolanos C.A.
- Evaluar los puntos críticos del proceso de cogeneración de vapor en la caldera N° 7 de Papeles Venezolanos C.A.
- Diseñar la automatización del proceso de cogeneración de vapor en la caldera N° 7 de Papeles Venezolanos C.A.
- Realizar estudio de factibilidad ambiental, social y económica.

## **1.4. Justificación**

Desarrollar el presente proyecto de investigación desde la perspectiva más general, permite la inducción dentro del campo laboral específico que debería dominar un ingeniero electrónico. Si bien es una oportunidad de aplicar conocimientos

adquiridos en el lapso de estudio en un ambiente práctico. El propósito de esta investigación sin duda se basa en la implementación de control lógico programable, automatización industrial, sensores y adquisición de datos. Que además otorga un beneficio social a la industria.

### **1.5. Limitaciones**

La principal limitación de este trabajo de grado es la obtención del paquete de software necesario para la elaboración del programa y las pantallas de interface hombre máquina (HMI) Las aplicaciones futuras a este proyecto tienen un carácter novedoso dentro del mercado laboral, puesto que en base a los conocimientos que se adquieran, es posible elaborar una propuesta de un proyecto. El presente diagnóstico se enfoca en la caldera de papeles venezolanos, c.a. Sin embargo, es posible realizar un proyecto general para proponer proyectos en industrias con necesidades y maquinaria similar. Se especifica la línea de investigación en gestión de proyectos de tecnologías de información.

### **1.6. Alcance**

Elaborar un sistema automatizado requiere de una alta experiencia y conocimiento en las aplicaciones de automatización industrial, las calderas son unas e las máquinas más comunes en las industrias. Este trabajo a pesar de representar un sistema completo de cogeneración, solo se basa en la automatización del proceso de cogeneración de vapor en una caldera de recuperación. Las calderas de recuperación por otro lado son calderas que no poseen un sistema de llama, ya que su función es aprovechar la energía en forma de calor que trae la combustión del gas natural.

## **CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO**

### **2.1. Antecedentes de la Investigación**

#### **2.1.1. Investigación Nacional**

Iglesias, Javier (2018). Investigación para optar al título de Ingeniero Electrónico de la Universidad José Antonio Páez, Valencia, Venezuela. Titulado **Automatización de un sistema de dosificación, mezclado y transporte de la materia prima para la alimentación de los hornos rotativos en una empresa metalúrgica**

El objetivo principal de este proyecto es automatizar un sistema de dosificación, mezclado y óptimo transporte de la materia prima para alimentar los hornos de fundición rotativos en una empresa metalúrgica. Tiene como propósito presentar métodos sistemáticos aprovechando las funciones y posibilidades que ofrecen actualmente los autómatas en comparación a los sistemas clásicos empleados hace unas décadas. Se toma como población y muestra los hornos de fundición rotativos de la empresa. Es un estudio descriptivo de modalidad proyecto factible, apoyado por revisión documental e investigación de campo. Se demostró que la aplicación de nuevas tecnologías resulta en mejoras para la automatización de procesos industriales.

Este proyecto brinda conocimientos necesarios para emplear una automatización, deja aportes sobre cómo desarrollar la lógica de programación en autómatas y también sobre cómo deben ser las conexiones de comunicación adecuadas entre estos dispositivos y una interface hombre-máquina. Se basa en información actual y se ubica dentro de la misma línea de investigación de la Universidad José Antoni Páez.

#### **2.1.2. Investigaciones Internacionales**

López, Paúl (2017). Investigación presentada para optar al grado académico de Ingeniero Electrónico En Control y Redes Industriales de la Escuela Superior Politécnica de Cimbrazo, Riobamba, Ecuador. Titulado **Diseño e implementación de**

**una caldera con control electrónico, utilizando material biodegradable como combustible.**

Este proyecto tuvo como objetivo disminuir el consumo de gas licuado de petróleo en las industrias, a través del aprovechamiento de la biomasa. Se diseñó para la fábrica de dulces la Selecta un quemador de biomasa en SolidWorks de tal manera que se adaptó a su sistema de fabricación. Se llevó a cabo un análisis comparativo de dos universos con un mínimo de 30 datos, el primer análisis representó al gas licuado de petróleo (GLP) y el segundo a la biomasa, los dos universos se obtuvieron en un mismo proceso. Se aplicó el método estadístico T-sudent con varianzas diferentes, sabiendo que un cilindro lleno de gas pesa 15 Kg, se obtuvo que; el consumo de biomasa fue menor al consumido de gas licuado, sin embargo, la diferencia no fue considerable. Se aplicó el mismo análisis en función al costo; el GLP fue extremadamente más costoso que la biomasa.

El anterior proyecto implicó en su elaboración el estudio de calderas y el control que debe ser empleado para este tipo de sistemas, independientemente del combustible utilizado la naturaleza de su funcionamiento no se ve afectada, y es por eso que se considera un buen material de apoyo para realizar el estudio y la instrumentación adecuada en una caldera.

Seguidamente Ramírez, Juan (2015). Monografía de grado para optar al título de Especialista En Control E Instrumentación Industrial de la Universidad Pontificia Bolivariana, Bucaramanga, Colombia. Titulado **Diagnóstico y propuesta de mejora del sistema de control e instrumentación de la caldera de la Planta Extractora de Palmas del Cesar S.A.**

Esta monografía atiende la problemática generada por el sistema de control e instrumentación de la caldera de la planta extractora de Palmas del Cesar S.A. la cual presenta una gran fluctuación en la presión de vapor y una limitada capacidad para responder efectivamente, a las cantidades de vapor demandadas por el proceso de producción. Se dio una revisión de las características del combustible utilizado. Luego de esto, se llevo a cabo una revisión de lo referente a las calderas, los tipos de

construcción, características y condiciones de operación. Se identificaron cinco problemas a ser atendidos. Las acciones de mejora en los sistemas de control sugirieron para diferentes tipos de calderas, sin embargo, fueron ajustadas a la situación particular del caso de estudio.

La monografía anterior plantea la instrumentación en una caldera para mejorar problemas de fluctuación de vapor, que está íntimamente en relación con el proyecto en estudio, no atiende un problema exactamente igual y esa es su única diferencia, aparte del tipo de caldera en estudio. Se tomarán en cuenta las recomendaciones y los resultados para evitar el problema de fluctuación de vapor que pudiera presentarse en el presente proyecto.

## **2.2. Bases Teóricas**

### **2.2.1. Generación de Vapor**

#### **Definición**

La generación industrial de vapor es el proceso mediante el cual se produce vapor a presiones por encima de la atmosférica, a partir de la energía de un combustible, o de energía eléctrica. El vapor producido será posteriormente utilizado en diferentes funciones de la fábrica, tales como aportación de calor en procesos o movimiento de máquinas. El vapor de agua constituye el fluido energético ideal para la industria, que necesita la utilización de calor a diversos niveles de temperatura, generalmente entre los 90°C y 260°C, que corresponden a 0,5 kg/cm<sup>2</sup> y 60 kg/cm<sup>2</sup>, aproximadamente. El alto calor latente y la pequeña densidad de este fluido hacen que el vapor de agua sea especialmente efectivo en las operaciones de calentamiento. Su uso se extiende prácticamente a todas las unidades de procesos químicos.

#### **Campos de aplicación**

Para la distribución o transporte de calor se utilizan principalmente tres tipos de fluidos en función de los requerimientos o necesidades del proceso: vapor, agua o aceite. El vapor de agua es el fluido térmico más ampliamente utilizado. La generalización del uso está basada en un conjunto de características singulares que le convierten en prácticamente insustituible.

Son destacables:

- Materia prima barata y asequible.
- Amplio rango de temperatura.
- Ininflamable y no tóxico.
- Fácilmente transportable por tubería.
- Elevado calor de condensación.
- Elevado calor específico.
- Temperatura de condensación fácilmente regulable.

### **2.2.2. Calderas Industriales**

Ronaldo, A. (2016), afirma que, Una caldera es un recipiente cerrado a presión en el que se calienta un fluido para utilizarlo por aplicación directa del calor resultante de la combustión de una materia combustible (sólida, líquida o gaseosa) o por utilización de energía eléctrica o nuclear. Además, se puede decir que una caldera de vapor, es un recipiente cerrado en el cual se genera vapor de agua o de otro fluido para su uso externo. Una caldera es un aparato de transferencia térmica que convierte un combustible (Fósil, bagazo, gas, eléctrica o nuclear) a través de un medio de trabajo. El flujo de calor puede tener lugar de tres modos en el interior de una caldera.

A continuación, se presenta la clasificación de las calderas según, Martínez, J. (2013)

#### **Clasificación de la Calderas Según la Disposición de los Fluidos**

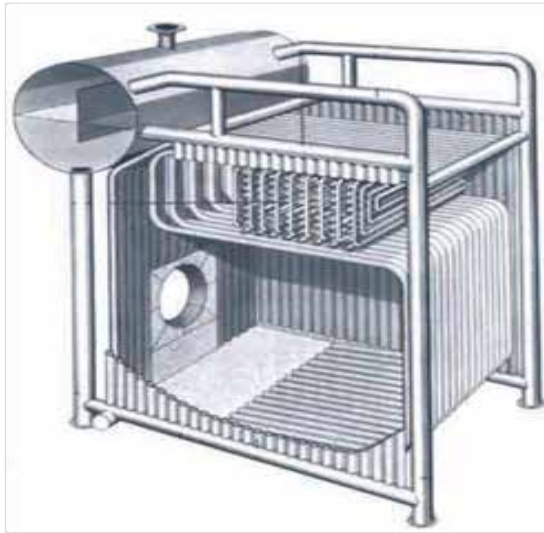
##### **- Calderas Acuotubulares**

Son aquellas calderas en las que el fluido de trabajo se desplaza por el interior de tubos durante su calentamiento y los gases de combustión circulan por el exterior de los mismos. Son de aplicación cuando se requiere una presión de trabajo por encima de los 22 bar (Ver Figura 3).

En el caso de calderas de vapor, el título de vapor es muy bajo (0,85), es decir, que el contenido de agua por unidad de masa es muy alto (15%) si no se les añaden subconjuntos secadores del vapor, tales como recalentadores o sobre calentadores.

Las exigencias de la calidad del agua de alimentación a estas calderas suelen ser superior al requerido para otro tipo de calderas.

Los generadores instantáneos también forman parte de la familia de calderas acuotubulares.



**Figura 3.** Detalle de caldera acuotubular  
**Fuente:** Martínez, J. (2013)

#### - Calderas Piro-tubulares

Son aquellas calderas en las que los gases de la combustión circulan por el interior de los tubos y el líquido se encuentra en un recipiente atravesado por dichos tubos. Son de aplicación principalmente cuando la presión de trabajo es inferior a los 22 bar (Ver Figura 4).

Dicho volumen de agua les permite adaptarse mejor a las variaciones de la instalación que las calderas acuotubulares.

El vapor producido por las misma suele tener un título de vapor cercano al 1, es decir, que el contenido de agua por unidad de masa es bajo (3%), no siendo necesario instalar equipos auxiliares complementarios.

Las exigencias de la calidad del agua de alimentación son menores a las requeridas por las calderas acuotubulares.



**Figura 4.** Detalle de caldera pirotubular  
**Fuente:** Martínez, J. (2013)

### **Clasificación de las Calderas por su Tecnología**

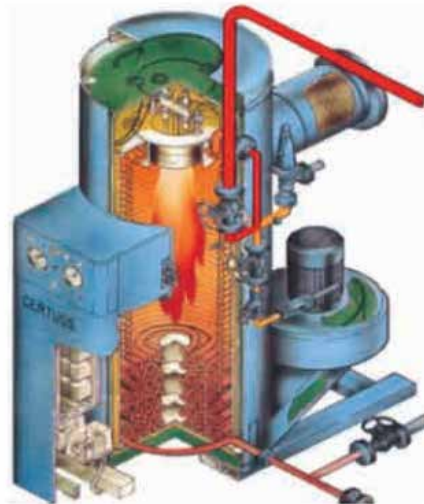
Las calderas o generadores son equipos que, aplicando el calor de un combustible gaseoso, líquido o sólido mediante quemador especialmente diseñado para cada combustible, calientan el agua hasta 95 °C (calderas de agua caliente), por encima de los 100 °C (calderas de agua sobrecalentada), calientan agua y producen su cambio de estado de fase líquida a fase gaseosa (calderas de vapor), o calientan un fluido caloportador diferente al agua (calderas de fluido térmico).

#### **- Calderas de Agua Caliente**

Las calderas de agua caliente son aquellas en las que el fluido caloportador es el agua y tienen una temperatura máxima de servicio inferior a 100 °C. Este tipo de calderas pueden ser acuotubulares o pirotubulares (Ver Figura 5).



**Figura 5.** Caldera pirotubular de agua caliente  
**Fuente:** Martínez, J. (2013)



**Figura 6.** Caldera acuotubular de fluido térmico  
**Fuente.** Martínez, J (2013)

#### - Calderas de Agua Sobrecalentada

Las calderas de agua sobrecalentada son aquellas en las que el fluido calorportador es el agua y tienen una temperatura máxima de servicio superior a 110 °C. Este tipo de calderas pueden ser acuotubulares o pirotubulares.

### - **Calderas de Fluido Térmico**

Las calderas de fluido térmico son aquellas en las que el fluido caloportador es distinto al agua. Este tipo de calderas pueden ser únicamente acuotubulares (Ver Figura 6).

### - **Calderas de Vapor**

Las calderas de vapor son aquellas en las que el fluido caloportador es vapor de agua. Este tipo de calderas pueden ser acuotubulares o piro-tubulares (Ver Figura 7).



**Figura 7.** Caldera piro-tubular de vapor con economizador incorporado

Fuente. Martínez, J. (2013)

### **2.2.3. Caldera de Recuperación**

Una caldera es un aparato a presión, donde el calor procedente de un combustible o de otra fuente de energía se transforma en energía térmica, utilizable a través de un fluido caloportador en fase líquida o vapor. Las calderas que se utilizan en las plantas de cogeneración son calderas que recuperan el calor contenido en los gases de escape de la máquina térmica de combustión (motor o turbina de gas). En ellas se calienta agua, que se convierte en vapor y que se utiliza para mover una turbina de vapor y/o como fluido caloportador que aporta calor a alguna fase del proceso industrial al que está asociada la planta de cogeneración. Son el elemento de unión entre la generación de electricidad y la generación de calor útil.

## **Caldera de Recuperación Vertical**

Este tipo de calderas son parecidas en su configuración a las calderas convencionales, constan de una estructura sobre la que apoyan los calderines y de la que cuelgan los soportes de los haces horizontales de tubos. En estas calderas, los tubos dilatan mejor, no están sometidos a tensiones térmicas tan elevadas, y son más accesibles para inspección y mantenimiento.

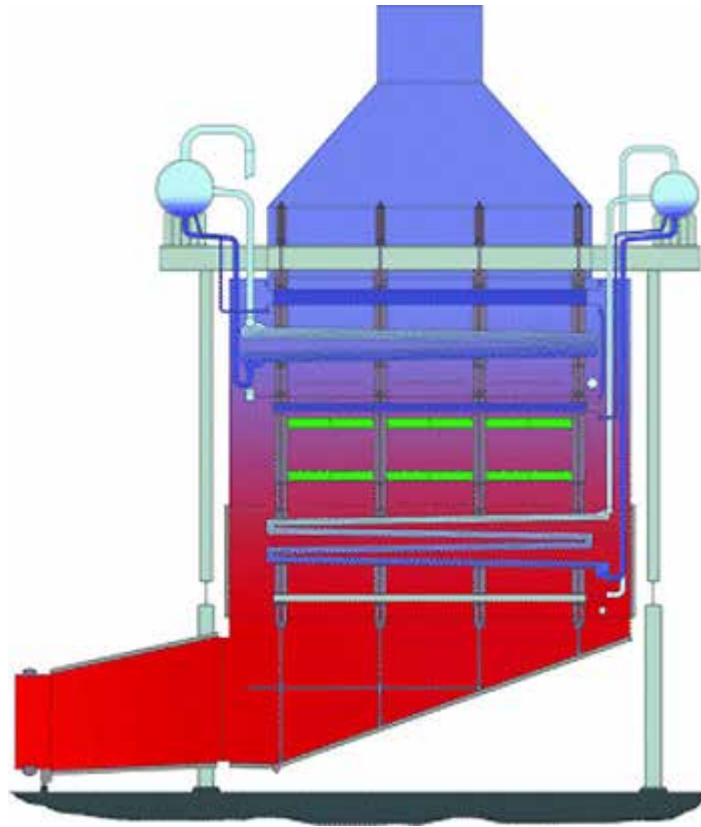
Algunas calderas verticales tienen circulación forzada, otras, circulación asistida en los arranques, y la tendencia es a diseñarlas con circulación natural, lo que implica elevar la posición de los calderines para conseguir que la diferencia de densidad entre la columna de agua de los tubos de bajada del colector o down commers y de los tubos de salida del colector del evaporador al calderín o risers, asegure la circulación a través de los tubos evaporadores horizontales.

En este tipo de calderas el aislamiento suele ser interior, con protección de la capa aislante, o mixto, con recubrimiento interno de fibra cerámica en la parte superior donde los gases son más fríos.

Aunque operacionalmente estas calderas no son tan especiales, las exigencias de control de calidad durante la construcción y la pureza del agua de alimentación son requisitos similares a los de las calderas horizontales, así como las limitaciones y precauciones en subidas y bajadas de carga.

La forma normal de operación en este tipo de calderas es en presión deslizante, donde la presión del vapor fluctúa de acuerdo con el flujo de vapor, permaneciendo completamente abiertas las válvulas de la turbina. Esta forma de operación maximiza el rendimiento de la caldera a cargas parciales, ya que, si decrece la producción de vapor, al reducirse el caudal y la temperatura de los gases de escape de la turbina de gas, también se reduce la presión, y con ella la temperatura de saturación, con lo que se consigue una alta vaporización y la recuperación de la mayor parte de la energía de los gases.

Ejemplo de caldera de recuperación (Ver Figura 8).



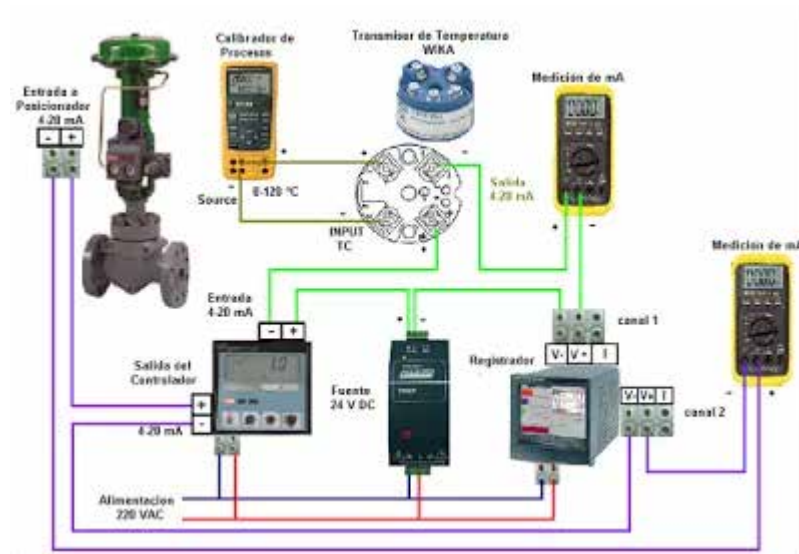
**Figura 8.** Caldera de recuperación de calor vertical  
Fuente: OPEXenergy

#### **2.2.4. Instrumentación Industrial**

En todos los procesos, es absolutamente necesario controlar y mantener constantes algunas magnitudes, tales como la presión, el caudal, el nivel, la temperatura, el pH, la conductividad, la velocidad, la humedad, etc. Los instrumentos de medición y control permiten el mantenimiento y la regulación de estas constantes en condiciones más idóneas que las que el propio operador podría realizar. En pocas palabras la instrumentación se encarga de mantener funcionando el proceso de manera óptima a través de elementos que sirven para medir, convertir, transmitir, controlar o registrar las variables.

En la Figura 9, podemos ver algunos de los componentes principales de la instrumentación:

- Transmisor: sirve para recibir la señal del sensor y convertirla a un estándar de 4-20 ma.
- Registrador: como su nombre lo indica registra el estatus del proceso.
- Salida del controlador: Controla la señal de salida, para mandarla al actuador, manteniendo la variable a controlar lo más cercano posible al set point.

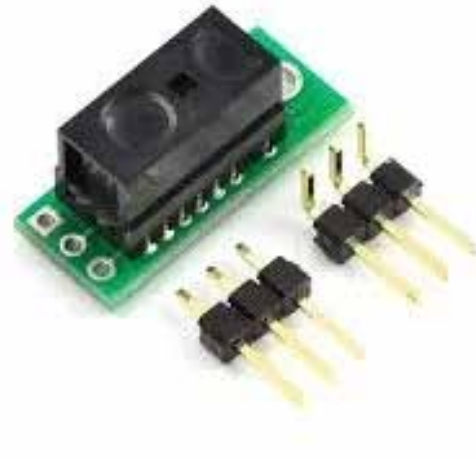


**Figura 9.** Componentes de la instrumentación  
Fuente: Mecafenix, F. (2017)

### Conceptos Básicos en la instrumentación

- **Sensor:** llamamos sensor a un dispositivo que mide de manera automática una variable, como por ejemplo la temperatura, la presión o inclusive el régimen de giro, entre otras cosas (Ver Figura 10).
- **Transmisor:** se conoce como transmisor en el campo de la instrumentación y control al conjunto acondicionador de señal (Ver Figura 11).
- **Transductor:** es el instrumento o dispositivo capaz de transformar la energía disponible en una magnitud física dada en otra magnitud, Se usan por ejemplo para

pasar de magnitudes acondicionadas en presión a corriente o tensión y modernamente a variables digitales para buses de campo.

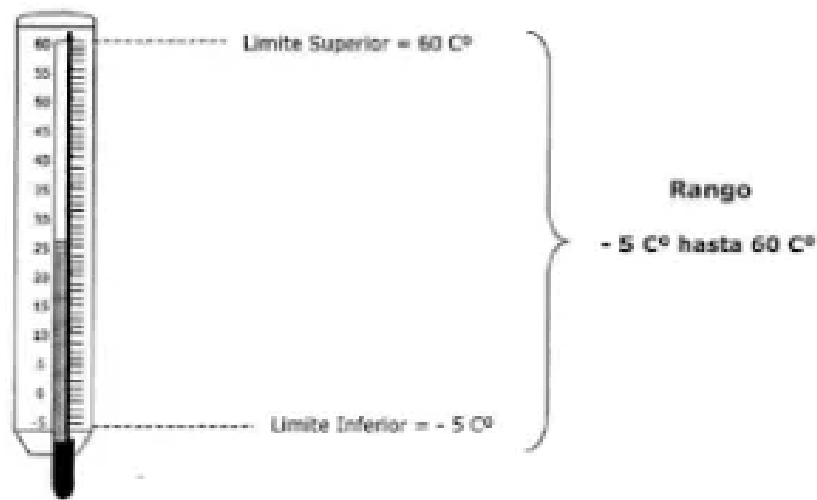


**Figura 10.** Sensor Infrarrojo digital  
Fuente: Mecafenix, F. (2017)



**Figura 11.** Transmisor SIEMENS  
Fuente: Mecafenix, F. (2017)

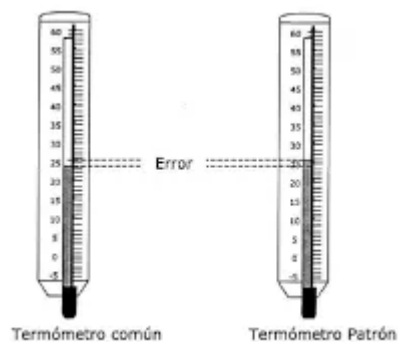
- **Rango:** es el conjunto de valores comprendidos entre los límites (Superior e Inferior) que es capaz de medir el instrumento al que nos referimos (Ver Figura 12).



**Figura 12.** Rango de un termómetro

Fuente: Mecafenix, F. (2017)

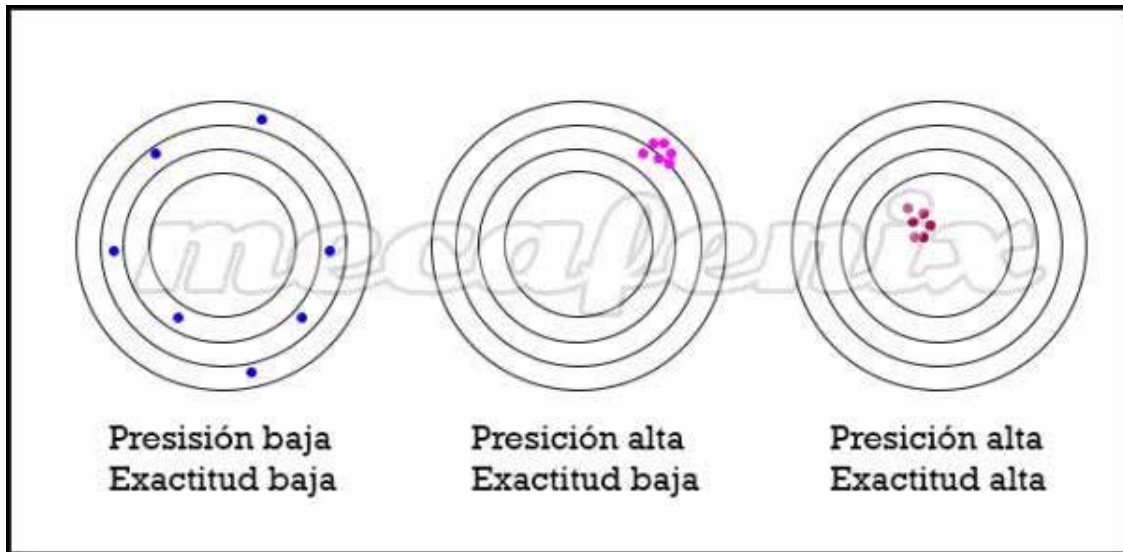
- **Resolución:** es el menor cambio en la variable del proceso capaz de producir una salida perceptible en el instrumento.
- **Error:** se lo define como la diferencia entre el valor medido y el valor verdadero (Ver Figura 13).



**Figura 13.** Error (termómetro común-termómetro patrón)

Fuente: Mecafenix, F. (2017)

- **Exactitud:** capacidad de un instrumento de dar valores de error pequeños.
- **Precisión:** cuanto mayor es la precisión menor es la dispersión de los valores de la medición alrededor del valor medido (Ver Figura 14).



**Figura 14.** Precisión-Exactitud

Fuente: Mecafenix, F. (2017)

- **Repetibilidad:** capacidad de un instrumento de repetir la salida cuando se llega a la medición en diversas ocasiones bajo exactamente las mismas condiciones.
- **Histéresis:** es la capacidad de un instrumento de repetir la salida cuando se llega a la medición en ocasiones consecutivas bajo las mismas condiciones generales pero una vez con la medición de la variable en un sentido (por ejemplo, creciente) y en la siguiente con la variable en sentido contrario (por ejemplo, decreciente).
- **Error de cero:** aun cuando el valor de la variable del proceso esté en el mínimo del rango, donde la salida del instrumento debe ser el valor asociado al cero del rango (en corriente por ejemplo 4 mA), el instrumento marca a su salida un valor distinto de cero.

### Control de Procesos

La instrumentación y control de procesos es una especialidad de la ingeniería que combina, a su vez, distintas ramas, entre las que destacan: sistemas de control, automatización, electrónica e informática. Su principal aplicación y propósito es el análisis, diseño y automatización de procesos de manufactura de la mayor parte de las áreas industriales: petróleo y gas, generación de energía eléctrica, textil, alimentaria,

automovilística... Derivado de que todo proceso de fabricación y manufactura requiere de un control, la ingeniería de instrumentación y control de procesos tiene una aplicación en el sector productivo en las siguientes áreas: diseño y mantenimiento. Analizar e incorporar los componentes básicos de medición, así como lazos de control, en el proceso de desarrollo de la ingeniería de un proyecto para la fabricación, construcción y/o modificación de parámetros de plantas industriales.

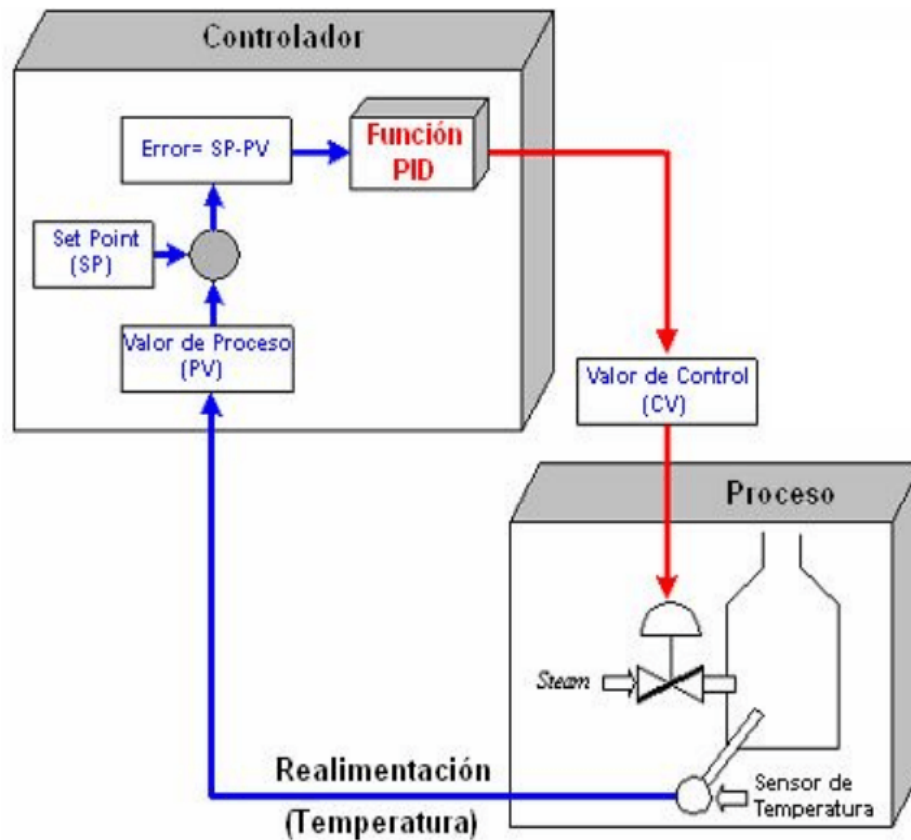
El ingeniero de instrumentación y control de procesos participa en el desarrollo de las hojas de especificaciones técnicas de los instrumentos que integran los lazos de control, así como la arquitectura de control, que se utilizará y revisión de los planos de tubería e instrumentación, desarrollo de la lógica de control, que puede ser, del tipo electrónica, neumática o hidráulica.

### **Controlador PID**

Éste es un tipo de realimentación, en concreto un Control Proporcional, en el que se incluye la acción derivativa y la acción integral simultáneamente para controlar un proceso dinámico. De esta forma el regulador se adelanta en su respuesta a la inercia del sistema y mientras que intenta evitar el error estacionario consiguiendo así mantener la ejecución de un proceso lo más cerca posible de un punto de consigna deseado (Ver Figura 15).

### **Parámetros de un Lazo de Regulación PID**

- **Banda Proporcional (Pb):** cuanto más grande es el valor, más lenta es la aproximación del valor de la variable a la preselección, pues la acción proporcional empieza antes evitando así oscilaciones innecesarias. En cambio, el sistema también se vuelve lento en su reacción ante perturbaciones. Si la Banda Proporcional es pequeña, la acción proporcional empieza más tarde y el sistema tiende a hacerse más oscilatorio. De hecho, si  $P_b = 0$ , se elimina la acción proporcional y la regulación del sistema se convierte en un control ON-OFF. El valor adecuado del parámetro  $P_b$  está en un punto intermedio (Set point  $\pm P_b$ ), que es el idóneo para un buen funcionamiento.



**Figura 15.** Ejemplo control PID

Fuente: Contaval (2016)

- **Tiempo derivativo (td):** la constante derivativa desacelera tanto la subida y bajada del Process Value (PV), para intentar adelantarse a la acción de la inercia del sistema. Gracias a esta constante, si se aumenta el tiempo derivativo, se incrementa el frenado de la variable y hacemos el sistema más lento, pero menos oscilante. En cambio, si se disminuye el valor de dicha constante, el sistema se vuelve más rápido pero menos estable (más oscilante) ya que se disminuye el freno de la inercia del sistema.
- **Tiempo integral (ti):** esta constante influye en la eliminación del error estacionario del sistema. De este modo, al aumentar su valor se consigue un sistema más oscilante y menos preciso (se desvía más del valor de la preselección sobrepasando

su set point). Al reducir el tiempo integral, es posible que ésta descienda en exceso y que la variable se desvíe de la preselección por debajo del punto de consigna (se ha disminuido la corrección del error estacionario).

### **2.2.5. Automatización Industrial**

Disciplina de control que se basa en el uso de sistemas electromecánicos para controlar procesos industriales. Abarca control, sistemas digitales, supervisión, gestión de datos, accionamientos, instrumentación y comunicaciones. La automatización industrial conforma un sistema que reduce la exigencia humana, estandarizando y dando trazabilidad en las líneas de producción.

#### **- Controlador Lógico Programable (PLC).**

De acuerdo con la definición de la NEMA (National Electrical Manufacturers Association) un PLC es: “Un aparato electrónico operado digitalmente, que usa una memoria programable para el almacenamiento interno de instrucciones para implementar funciones específicas, tales como lógica, secuenciación, registro y control de tiempos, conteo y operaciones aritméticas para controlar, a través de módulos de entrada/salida digitales (ON/OFF) o analógicos (1-5 VDC, 4-20 mA, etc.), varios tipos de máquinas o procesos”.

El PLC, o PAC (controlador de automatización programable), está diseñado para múltiples entradas/salidas, rangos de señal, inmunidad al ruido y resistencia a vibración e impacto. Los programas de control se almacenan en memoria no volátil.

#### **- Interface Hombre Máquina (HMI).**

según Cobo, R. (2018) significa “Human Machine Interface”, es decir es el dispositivo o sistema que permite el interfaz entre la persona y la máquina. Tradicionalmente estos sistemas consistían en paneles compuestos por indicadores y comandos, tales como luces pilotos, indicadores digitales y análogos, registradores, pulsadores, selectores y otros que se interconectaban con la máquina o proceso. En la actualidad, dado que las máquinas y procesos en general están implementadas con controladores y otros dispositivos electrónicos que dejan disponibles puertas de comunicación, es posible contar con sistemas de HMI bastantes más poderosos y

eficaces, además de permitir una conexión más sencilla y económica con el proceso o máquina.

La Interfaz Hombre Máquina (HMI) es la interfaz entre el proceso y los operadores, básicamente un panel del operador. Es la herramienta principal con la cual los operadores y los supervisores de la línea coordinan y controlan los procesos industriales y de fabricación en la planta. Las HMI sirven para traducir las variables del proceso complejas en información útil y aprovechable.

Mostrar la información operativa en tiempo real es dominio de la HMI. Los gráficos del proceso visuales dan sentido y contexto al estado del motor y de la válvula, los niveles del tanque y otros parámetros del proceso. Las HMI proporcionan un conocimiento operacional del proceso y permiten el control y la optimización mediante la regulación de los objetivos del proceso y la producción.

### **2.3. Bases Legales**

El Marco Legal que sustenta este estudio está relacionado con el desarrollo de ciencia y tecnología para proyectos factibles, tomando como referencia citas legales procedentes de la Constitución de la República Bolivariana de Venezuela (2009).

Según el artículo 109 página 28 de la Constitución de la República Bolivariana de Venezuela (N° 5.908, 2009):

El Estado reconocerá la autonomía universitaria como principio y jerarquía que permite a los profesores, profesoras, estudiantes, egresados y egresadas de su comunidad dedicarse a la búsqueda del conocimiento a través de la investigación científica, humanística y tecnológica, para beneficio espiritual y material de la Nación.

Según el artículo 110 página 28 de la Constitución de la República Bolivariana de Venezuela (N° 5.908, 2009):

Para el fomento y desarrollo de la ciencia, tecnología e innovación y sus aplicaciones, el estado destinará recursos suficientes y creará el sistema nacional de ciencia y tecnología de acuerdo con la ley. El sector privado deberá aportar recursos para las mismas. El Estado garantizará el cumplimiento de los principios éticos y legales que deben regir las actividades de investigación científica, humanística y tecnológica. La ley determinará los modos y medios para dar cumplimiento a esta garantía.

La constitución deja en claro el deber que tiene el sector privado para contribuir con el desarrollo de la ciencia, tecnología e innovación, lo que permite la colaboración por parte de Papeles Venezolanos C.A., con el presente proyecto.

Según el artículo 129 página 33 de la Constitución de la República Bolivariana de Venezuela (N° 5.908, 2009):

Todas las actividades susceptibles de generar daños a los ecosistemas deben ser previamente acompañadas de estudios de impacto ambiental y sociocultural. El Estado impedirá la entrada al país de desechos tóxicos y peligrosos, así como la fabricación y uso de armas nucleares, químicas y biológicas. Una ley especial regulará el uso, manejo, transporte y almacenamiento de las sustancias tóxicas y peligrosas.

La constitución refleja que cada actividad que genera daño al ambiente debe venir acompañada de un estudio de factibilidad ambiental, tal y como se presenta en los objetivos específicos de este trabajo.

#### **2.4. Definición de Términos Básicos**

**Caudal o Flujo:** “se define como caudal o flujo al volumen de líquido que fluye (es decir que pasa por una sección transversal) en un determinado tiempo”. Física Practica (2019).

**Ciclo Brayton:** “un ciclo Brayton (o Joule) ideal modela el comportamiento de una turbina, como las empleadas en las aeronaves. El ciclo Brayton describe el comportamiento ideal de un motor de turbina de gas, como los utilizados en las aeronaves. Las etapas del proceso son admisión, compresión, combustión, turbina y escape”. Sabugal, S., y Gómez, F. (2006).

**Offset:** Valor constante de la variable de control que se mantiene fuera del punto de consigna.

**Ciclo Rankine:** “es un ciclo que opera con vapor, y es el que se utiliza en las centrales termoeléctricas. Consiste en calentar agua en una caldera hasta evaporarla y elevar la presión del vapor. Éste será llevado a una turbina donde produce energía cinética a

costa de perder presión. Su camino continúa al seguir hacia un condensador donde lo que queda de vapor pasa a estado líquido para entrar a una bomba que le subirá la presión para nuevamente introducirlo a la caldera”. Sabugal, S., y Gómez, F. (2006).

**Reinstrumentación:** la instrumentación industrial es el grupo de equipamientos y dispositivos que sirven a los ingenieros o técnicos, justamente, para medir, convertir y registrar variables de un proceso (o “cuerpo industrial”) y, luego, transmitir las, evaluarlas y controlarlas con tales fines. Se llama instrumentación al procedimiento correspondiente para mejorar y actualizar los componentes que hacen posible un proceso industrial, Omega Engineering (2017)

**Set-Point:** “punto en que una señal se establece bajo ciertos parámetros deseados. Es un punto de consigna para valor de la señal de la variable”. López, J. (2017).

**Vapor Saturado:** “vapor cuya temperatura es igual a la temperatura de ebullición a la presión existente”. RAING (2019).

**Eficiencia Energética:** la eficiencia energética es una actividad que tiene por objeto mejorar el uso de fuentes de energía. El uso racional de la energía también llamado simplemente la eficiencia energética, es utilizar la energía de manera eficiente para obtener un cierto resultado. Por definición, la eficiencia energética es la relación entre la cantidad de energía utilizada en una actividad y la prevista para su realización.

## **CAPÍTULO III MARCO METODOLÓGICO**

Una vez culminado el proceso de recolección de información sobre antecedentes y bases teóricas que sustenten la investigación se requiere realizar de manera ordenada un plan o guía para aplicar el conocimiento adquirido, correspondiendo esta parte del proyecto al marco metodológico. Tamayo y Tamayo (2003) define el marco metodológico como: “un proceso que, mediante el método científico, procura obtener información relevante para entender, verificar, corregir o aplicar el conocimiento” (p. 37).

### **3.1. Modalidad de la Investigación**

Para desarrollar la investigación debemos enmarcarla según la modalidad. El proyecto factible es una modalidad que cumple cualquiera de los aspectos: investigación, elaboración y desarrollo de propuesta de modelo operativo viable para solucionar problemas o necesidades de organización o grupos sociales; formulación de políticas, programas, tecnologías, métodos o procesos; y además está apoyada en investigación documental y de campo. Según García, L. y Mijares, H. (2009). Debido a esto la presente investigación es un proyecto factible.

### **3.2. Diseño de la Investigación**

“El diseño de investigación es la estrategia general que adopta el investigador para responder al problema planteado. En atención al diseño, la investigación se clasifica en: documental, de campo y experimental”. Arias, F (2012).

“La investigación de campo es aquella que consiste en la recolección de datos directamente de los sujetos investigados, o de la realidad donde ocurren los hechos (datos primarios), sin manipular o controlar variable alguna, es decir, el investigador obtiene la información, pero no altera las condiciones existentes. De allí su carácter de

investigación no experimental”. De acuerdo a lo mencionado anteriormente el diseño de la investigación, es documental.

### **3.3. Nivel de la Investigación**

Para abordar la investigación se necesita tener claro el nivel. “El nivel de la investigación se refiere a grado de profundidad con que se aborda un fenómeno u objeto de estudio”. Arias, F. (2012).

Arias, F. (2012). “La investigación descriptiva consiste en la caracterización de un hecho, fenómeno, individuo o grupo, con el fin de establecer su estructura o comportamiento. Los resultados de este tipo de investigación se ubican en un nivel de conocimiento intermedio en cuanto a la profundidad de los conocimientos se refiere”. (p. 24).

De acuerdo a lo explicado por Arias, F. (2012), el nivel correspondiente para abordar la investigación presente será nivel descriptivo, en tal sentido las conclusiones serán de un nivel intermedio en lo que respecta a la profundidad del conocimiento.

### **3.4. Población y Muestra**

La población, o en términos más precisos población objetivo, la define Arias, F. (2012) como, “un conjunto finito o infinito de elementos con características comunes para los cuales serán extensivas las conclusiones de la investigación. Ésta queda delimitada por el problema y por los objetivos del estudio”. Así también Arias, F. (2012), define la muestra cómo, “un subconjunto representativo y finito que se extrae de la población accesible”.

De acuerdo a lo definido anteriormente sobre población y muestra, se tomará en este caso una muestra censal. Siendo el objeto de estudio, la caldera N° 7 de Papeles Venezolanos, C.A.

### **3.5. Técnicas e Instrumentos de Recolección de Información**

Sabino. C. (1992), lo define así: “un instrumento de recolección de datos es en principio cualquier recurso del que pueda valerse el investigador para acercarse a los fenómenos y extraer de ellos información. De este modo el instrumento sintetiza en si toda la labor previa de la investigación, resume los aportes del marco teórico al

seleccionar datos que corresponden a los indicadores y, por lo tanto, a las variables o conceptos utilizados.”

### **3.5.1. Descripción de Técnicas e Instrumentos**

#### **- Instrumento de Recolección de Información**

Permite poseer un soporte de la información en periodos de tiempo relativamente largos de modo que el investigador pueda recuperar la información cuando lo necesite. Se realizó un registro no estructurado que se compone de una libreta de notas y palabras claves para identificar los puntos críticos, además se usó una cámara para registrar fotografías de los instrumentos asociados

#### **- Técnica de Análisis Documental**

La revisión documental es hacer una recopilación de información sobre textos e investigaciones generados por otros investigadores que tienen relación directa o indirecta con la problemática que es razón de estudio. Hurtado, J (2010) define este concepto como, “es una técnica en la cual se recurre a información escrita, ya sea bajo la toma de datos que pueden haber sido producto de mediciones hechas por otros como texto en sí mismo constituyen los eventos de estudio”.

#### **Instrumentos de Recolección de Información:**

- a) Computadora y unidades de almacenamiento (pendrive, disco duro...)

#### **- Técnica de Observación Directa**

La observación directa es el proceso en el cual el investigador recolecta datos directamente desde el medio ambiente del fenómeno a estudiar, por otro lado, Hurtado (2010) la define como, “un proceso de atención, recopilación, selección y registro de información para el cual el investigador se apoya en sus sentidos”.

#### **Instrumentos de Recolección de Información:**

- a) Diario de campo.
- b) Equipo de registro fotográfico, en este caso smartphome.

#### **- Técnica de Entrevista no Estructurada**

La entrevista, más que un simple interrogatorio, “es una técnica basada en un diálogo o conversación “cara a cara”, entre el entrevistador y el entrevistado acerca de

un tema previamente determinado, de tal manera que el entrevistador pueda obtener la información requerida”. Arias, F. (2012)

**Instrumento de Recolección de Información:**

- a) Libreta de notas

**3.6. Fases Metodológicas de la Investigación**

**FASE I. Diagnóstico de la situación actual presente en el proceso de cogeneración de vapor en la caldera N° 7 de Papeles Venezolanos C.A.**

Actividades:

- Realización de una revisión documental, sobre los aspectos teóricos que implican, automatización, control, instrumentación industrial y calderas.
- Se solicito por medio de una persona cuyo cargo empresarial lo permita, acceso a las instalaciones de la empresa Papeles Venezolanos, C.A.
- Observación, estudio y comprensión del proceso en el que se involucra la caldera con ayuda de un operador experto en la empresa.
- Toma de notas, de los instrumentos de medición y control que forman parte del proceso en la caldera.

**FASE II. Evaluación de los puntos críticos del proceso de cogeneración de vapor en la caldera N° 7 de Papeles Venezolanos C.A.**

Actividades:

- Según los puntos críticos observados en el diagnóstico, definiciones alternativas de instrumentación

**FASE III. Diseño de la automatización del proceso de cogeneración de vapor en la caldera N° 7 de Papeles Venezolanos C.A.**

Actividades:

- De acuerdo a la instrumentación, se realizó el diagrama de bloques acorde al funcionamiento de control, y el diagrama de control asociado.
- Según el fabricante y modelo del controlador lógico programable, se realizó la programación de la lógica de control, utilizando los lazos de control que requiera el proceso.

- Se selecciono el software adecuado, para realizar la simulación del proceso y comprobar el “correcto” funcionamiento.

**FASE IV. Estudio de factibilidad ambiental, social y económica.**

Actividades:

- Se obtiene la información necesaria que permita enmarcar el estudio de factibilidad.
- Representación de la información obtenida en tablas de cálculo con el fin de visualizar el estudio realizado

## **CAPÍTULO IV RESULTADOS**

### **4.1. Fase I: Diagnóstico de la situación actual presente en el proceso de cogeneración de vapor en la caldera N° 7 de Papeles Venezolanos C.A.**

Se inicia un diagnóstico que tiene como finalidad la comprensión del proceso de generación de vapor y la identificación de los puntos críticos en dicho proceso.

#### **4.1.1. Proceso de Producción de Vapor en la caldera N° 7 de Papeles Venezolanos C.A.**

La caldera N° 7 de Papeles Venezolanos C.A., es una caldera de recuperación, acuotubular que recibe la fuente de calor necesaria de los gases de escape de una turbina generadora eléctrica a gas, siendo parte de un proceso de cogeneración.

La caldera posee dos dampers de aislamiento, uno superior y uno inferior. Cada uno de ellos puede moverse manualmente mediante un volante ubicado en la caja de engranes. El damper superior abre aproximadamente 75° mientras que el damper inferior abre 90°. Cuando no se está generando vapor en la caldera #7, tanto el damper inferior como el damper superior se encuentran totalmente cerrados. Si se desea generar vapor, el operador debe abrirlos si el flujo de agua de recirculación es superior a 1330 GPM, esto con la intención de proteger la tubería interna de la caldera.

Para controlar la producción de vapor, se tiene un damper de By-Pass. El damper By-Pass es comandado por un posicionador Bailey (Ver Figura 16), que recibe una señal de 3 a 15 psi. La posición de falla del damper de By-Pass es normalmente abierto y se dispone de una válvula solenoide de interlock que habilita a que el By-Pass entre en control de presión o no dependiendo de que se cumplan las siguientes condiciones:

- Dampers superior e inferior totalmente abierto
- Flujo de recirculación superior a 1330 GPM
- Nivel de agua en la caldera superior al 30%

Solo cuando se cumplen estas condiciones es que el el By-Pass puede ser controlado para obtener la presión de vapor deseada, por el contrario, la válvula solenoide no se activa y el By-Pass permanecerá totalmente abierto.

Existen dos bombas de recirculación conectadas en paralelo, cuya función es recircular el agua en la caldera. Cada una de ellas está comandada por un motor de 100 Hp.

En el cuarto de control existe un panel donde están ubicados los instrumentos siguientes:

- Un Mod30 que controla el lazo de nivel de agua del domo, flujo de agua y flujo de vapor (Ver Figura 17)
- Un Mod30 que controla el lazo de presión de vapor del domo y flujo de agua de recirculación (Ver Figura 18).



**Figura 16.** Posicionador bailey  
Fuente: Leon, A. (2019)



**Figura 17.** ABB Taylor Mod30  
Fuente: Leon, A. (2019)



**Figura 18.** ABB Taylor Mod30  
Fuente: Leon, A. (2019)

#### **4.1.2. Situación Actual en la Caldera N° 7**

Para iniciar el diagnóstico se hizo un recorrido por la caldera acompañado de operadores expertos, que transmitieron de manera práctica el proceso anteriormente explicado. Ahora se describirá como se maneja actualmente el proceso en la producción de vapor.

Inicialmente para poner la caldera en un estado de producción de vapor, la turbina ya debe estar en un régimen permanente de funcionamiento, esto por lo general se cumple ya que la turbina no se detiene de manera frecuente. Antes empezar a producir vapor, el operador debe revisar que la caldera posea un nivel de agua por encima del 30%, dicho nivel viene referenciado por el nivel del domo, también debe existir un flujo de recirculación de agua mayor a 1130 GPM, como se especificó anteriormente. Una vez que se cumplan estas dos condiciones se procede a abrir de manera manual los dampers de aislamiento de la caldera.

Para iniciar la producción de vapor, se necesita ubicar un punto Set-Point indicando la presión de vapor a la que se quiere llegar, que son usualmente 245 psi. El operador hace esto de manera análoga a través de los comandos del Mod30 asociado al lazo de presión de vapor. El Mod30 asociado al lazo del nivel de agua del domo también se debe ajustar a un Set-Point de manera que el nivel de agua no disminuya de un 40% y no aumente de un 50%.

Si bien la caldera posee autómatas programables no se encuentra totalmente automatizada. La revisión y chequeo de los niveles de presión de vapor y agua se deben hacer constantemente, unas dos o tres veces por turno. Ya que no es la única tarea del operador y se tiene que dirigir al cuarto de control local, porque no dispone de un control remoto.

Adicionalmente, existe una serie de equipos que están fuera de servicio:

- Instrumentos de registro (Ver Figura 2)
- Control remoto PC-30 (Ver Figura 19)
- Válvula solenoide del damper de by-pass

- Transmisor de posición del damper de by-pass (Ver Figura 20)
- Medidores de temperatura RTD (Ver Figura 21)

#### 4.1.3. Identificación de los Puntos Críticos

En consecuencia con la situación actual descrita se identifican los siguientes puntos críticos:

- Falta de instrumentos de registro
- Dependencia de la intervención humana en el proceso.
- Falta de alarmas indicadoras en las variables a manejar

En el proceso de producción de vapor en la caldera N° 7 se debe medir o controlar las siguientes variables:

- Nivel del domo
- Presión de vapor
- Temperatura de vapor
- Flujo de recirculación de agua
- Posición del damper de by-pass
- Posición de los dampers de aislamiento
- Flujo de vapor
- Flujo de agua de alimentación



**Figura 19. PC-30 ABB**

Fuente: Leon, A. (2019)



**Figura 20.** Transmisor de posición del damper de by-pass  
Fuente: Leon, A. (2019)



**Figura 21.** Medidores de temperatura RTD  
Fuente: Leon, A. (2019)

## **4.2. Fase II: Evaluación de los puntos críticos del proceso de cogeneración de vapor en la caldera N° 7 de Papeles Venezolanos C.A.**

En la industria se requiere mantener las maquinas e instrumentos operando de forma continua, buscando siempre la innovación y mejora de las instalaciones, para mantener o mejorar la calidad de cierto producto o servicio.

En la empresa Papeles Venezolanos C.A., la automatización siempre fue un punto importante, y es por eso que hoy en día sigue ofreciendo sus productos al mercado. Sin embargo, existen actualmente, equipos obsoletos que ya no tienen soporte debido a que fueron descontinuados, lo que implica que cualquier fallo de estos equipos pone en riesgo la continuidad y el correcto funcionamiento del proceso. En este caso el proceso de producción de vapor en la caldera #7.

Es por este motivo que se hace una evaluación de los puntos críticos que afectan este proceso de generación de vapor. A continuación, se presentan alternativas de instrumentación según los puntos críticos.

### **4.2.1. Falta de Instrumentos de Registro**

La palabra “registro” se aplica a cualquier forma de almacenamiento de información que permite su recuperación por otros sistemas. Un instrumento de registro es un dispositivo cuya función es registrar el valor de una cantidad al medirla. Tenemos los registradores gráficos, las impresoras de computación, las grabadoras de cinta, los discos de computadoras, entre otros. Estos dispositivos tienen circuitos de acondicionamiento de señal para que las señales de entrada se puedan escalar de algún modo antes de registrarse. El instrumento de registro, permite además la totalización de las variables.

La totalización es un cálculo a que se hace a partir del registro de una variable, por lo general indica la producción o cuantas unidades de medida se registró en un tiempo fijo estimado; ejemplo la producción de vapor al día en unidades de Libras/horas.

Si aplicamos la totalización a la producción de vapor en la caldera N° 7 de Papeles Venezolanos C.A., se tendrá un respaldo en los reportes de calidad de servicio.

Para efectos prácticos este registro puede hacerse mediante un sistema digitalizado que es resulta fácilmente accesible y se puede almacenar.

#### **4.2.2. Automatización del Proceso de Cogeneración de Vapor.**

Se plantea a continuación una alternativa que aborda los puntos críticos identificados con la automatización.

Anteriormente se mencionó como funcionaban los dampers de aislamiento de la caldera, dichos dampers ya vienen adecuados de manera que se pueden acoplar a ellos motores eléctricos de 3/4 de Hp. Los motores de los dampers traen incorporado limitswitch para indicar su posición, así como también, protección por máximo torque y protección por sobrecarga. Debido a la obsolescencia de los controladores existentes en el control del proceso de generación de vapor en la caldera N° 7 de Papeles Venezolanos C.A., se propone realizar una migración para lograr la completa automatización del proceso de dichos equipos Abb Taylor Mod 30 a plc.

#### **Selección de los PLC**

La selección de un PLC como sistema de control depende de las necesidades del proceso productivo que tiene que ser automatizado, considerando como más importantes los aspectos que a continuación se en listan:

- **Espacio reducido.**

Cuando el lugar donde se tiene que instalar el sistema de control dentro de la planta es muy pequeño el PLC es la mejor alternativa, ya que aun con todos sus aditamentos necesarios llegan a ocupar un mínimo de espacio sin que esto vaya en detrimento de la productividad y la seguridad del personal y las instalaciones.

- **Procesos de producción periódicamente cambiantes.**

Existen industrias como es la automotriz que año con año se ve en la necesidad de cambiar el modelo del vehículo que sale de sus plantas, razón por la cual se tiene que modificar tanto la secuencia de armado como el reajustar los valores de tolerancia de las partes con las que se arma el vehículo. Siendo el arma principal de estos cambios,

las modificaciones que sufren las instrucciones del programa que controla la lógica de operación del PLC.

- **Procesos secuenciales.**

Es bien conocido que cuando una actividad que se repite una gran cantidad de veces durante cierto intervalo de tiempo, se convierte en una actividad monótona para el hombre, produciendo en determinado momento fatiga del tipo emocional, provocando la desconcentración y la inducción involuntaria de errores que pueden ser fatales, tanto para la integridad del hombre como para las instalaciones. Con un PLC se puede evitar lo anterior con tan solo implementar secuencias de control, ya que, no se perderá la precisión con la que tienen que hacerse.

- **Actuadores distintos en un mismo proceso industrial.**

Con un solo PLC se cuenta con la posibilidad de manipular actuadores de diferente naturaleza entre sí, y todavía más, con un mismo PLC se pueden dirigir diferentes líneas de producción en las que cada una tiene asignada a sus propios actuadores, esto último depende de la cantidad de salidas y en general del tamaño en cuanto a su capacidad para alojar el programa de usuario.

- **Verificación de las distintas partes del proceso de forma centralizada.**

Existe una gran cantidad de industrias en que la planta de producción se encuentra alejada de la sala de control, o también por ejemplo, como es en las plantas petroleras, se tiene la necesidad de verificar la operación a distancia de todas las refinerías. Con un PLC se tiene de manera natural el diseño de redes de comunicación, para que se canalice la información a una central desde la cual se pueda observar a distancia como se encuentra operando el sistema de control automático, y se visualice por medio de monitores la representación gráfica tanto de los sensores como de los actuadores.

### **Técnicas de Programación Selección de PLC's**

A la hora de seleccionar qué PLC utilizar para llevar a cabo el control de una instalación se deben analizar una serie de criterios que pueden ser agrupados en dos categorías: cuantitativos y cualitativos. Cuantitativos Cualitativos

- **Técnicas de Programación Selección Criterios Cuantitativos**

**Ciclo de ejecución:** Mide el tiempo que el autómata tarda en ejecutar una instrucción o un Kbyte de instrucciones. Depende directamente de la velocidad de la CPU del equipo e influirá directamente en el ciclo de scan.

**Capacidad de entradas y salidas:** Define el número de E/S se pueden conectar a un equipo. Determina por lo tanto la capacidad del equipo para conectarse con el proceso. Características de las entradas y salidas: Determina el tipo de E/S que se pueden conectar al autómata. Determina por lo tanto la forma en que el equipo se relaciona con el proceso.

**Módulos funcionales:** Algunos tipos de acciones que se pueden llevar a cabo sobre el proceso como por ejemplo el posicionamiento de ejes, el control de procesos continuos, la noción del tiempo, etc., requieren de módulos especiales que pueden ser añadidos al autómata para complementarlo pero que en su configuración básica quizá no tenga. Define el tamaño de la memoria del autómata programable y al igual que en el caso de los PC's, ésta se mide en bytes o múltiplos de bytes.

**Conjunto de Instrucciones:** No todos los autómatas son capaces de ejecutar los mismos tipos de instrucciones. Por ejemplo, no todos los autómatas son capaces de realizar operaciones en coma flotante. Esta característica determinará la potencia (capacidad) del equipo para afrontar el control de ciertos tipos de procesos.

**Comunicaciones:** Otra de las características más importantes a la hora de poder establecer comparaciones entre PLC's es la capacidad que tengan para intercambiar información con otros PLC's u otros módulos de E/S.

**Periferia y programadores:** Los PLC's pueden ser complementados con dispositivos auxiliares que sin ser esenciales para llevar a cabo su principal función (controlar un proceso), si facilitan ciertas tareas secundarias.

- **Técnicas de Programación Selección Criterios Cualitativos**

En la mayoría de los casos para llevar a cabo la elección final del tipo de PLC, es necesario tener en cuenta otros criterios que son difícilmente medibles y por tanto

comparables. Son los llamados criterios cualitativos. Como su propio nombre indica son criterios que hacen referencia a aspectos que determinan en cierta medida la calidad del PLC.

**Ayuda al desarrollo de programas:** Hace referencia a la cantidad de información y ayuda que presta la empresa distribuidora del equipo a nivel local o estatal. Hoy en día con el desarrollo de Internet gran parte de esta información estará recogida en páginas web del fabricante. Será pues importante evaluar el idioma en que están escritas, la facilidad para encontrar la información buscada en las mismas y la capacidad de esta información para resolver problemas reales. A veces esta información no es suficiente y se hace necesario contactar con algún especialista que haya sufrido el mismo problema que nosotros pretendemos resolver y que por tanto tenga la solución para el mismo. Por desgracia este tipo de criterio es difícil de evaluar a priori, es decir, que por lo general es más fácilmente evaluable cuando se presentan los problemas y hay que resolverlos para lograr poner en marcha la automatización.

**Fiabilidad del producto:** Es una característica muy importante que hace referencia directamente al funcionamiento del PLC. □ Por lo general la marca o nombre del fabricante del equipo es un aval suficiente para conocer el grado de fiabilidad del mismo.

**Servicios del suministrador (proveedor):** Es muy importante evaluar qué servicios extra aporta el distribuidor del equipo a nivel local o nacional, tales como: cursos de formación, su precio, el lugar de impartición y el número de fechas disponibles, capacidad para aportar recursos humanos, capacidad para aportar recursos técnicos, etc.

**Normalización en planta:** Esta característica hace referencia a la capacidad del equipo para ser conectado e intercambiar información de manera correcta y efectiva con el resto de dispositivos y equipos que ya estén instalados en una planta dada. Vendrá determinada por la capacidad del PLC de soportar estándares internacionales de comunicación, de programación, de conexión, de arquitectura, etc.

Hoy en día cada vez más fabricantes soportan mayor número de este tipo de estándares, pero la tendencia en el pasado reciente era hacia la “fidelización” del cliente mediante el empleo de sistemas de comunicación y arquitecturas totalmente incompatibles con las del resto de fabricantes de autómatas. De esta forma el único modo de conseguir tener una planta “normalizada” era en base a instalar siempre los equipos del mismo fabricante.

**Compatibilidad con equipos de otras gamas:** Ahondando en el punto anterior, incluso puede darse el caso en que dos equipos del mismo fabricante pero de gamas distintas no sean compatibles entre sí, desde el punto de vista de la conexión y la capacidad de comunicación.

**Costo:** Aunque el precio de un producto es un criterio cuantitativo que puede ser medido y comparado, su costo o valor apreciado no lo es. Este hace referencia a la apreciación de cuánto caro o barato le parece a una persona un producto. Lo que a una persona le parece caro a otra le puede parecer barato. Esta diferencia de apreciación suele venir marcada por que en la balanza de cada persona el peso de ciertos criterios es mayor o menor dependiendo de su experiencia o necesidades.

En el caso de los PLC’s, el resultado de este criterio vendrá dado por la correlación entre el costo del equipo y el resto de características cualitativas del mismo

A continuación, se presentan las variables digitales que conformarán el sistema de control:

- 2 entradas digitales provenientes de los relés térmicos instalados en los sistemas de seguridad de los motores de los dampers de aislamiento.
- 1 entrada digital Proveniente del sistema de parada de emergencia.
- 3 entradas digitales provenientes de los relés térmicos instalados en los sistemas de seguridad de las 2 bombas de recirculación de agua y la bomba de alimentación de agua.
- 4 entradas digitales Provenientes de los motores de los limitswitch, que indican la posición de los dampers de aislamiento de la caldera (abierto/cerrado).

- 1 salida digital para indicar que el sistema se encuentra en funcionamiento.
- 1 salida digital para indicar que el sistema se ha detenido.
- 1 salida digital para activar una alarma.
- 1 salida digital para activar la válvula solenoide de interlock, que habilita a que el by-pass entre en control o no.
- 4 salidas digitales para abrir o cerrar los motores de los dampers de aislamiento.
- 3 salidas digitales para encender las 2 bombas de recirculación de agua y la bomba de alimentación de agua.

A continuación se presentan las variables analógicas que intervienen en el sistema de control:

- 1 entrada analógica proveniente del transmisor de nivel, instalado en el domo de la caldera.
- 1 entrada analógica proveniente del transmisor de presión, que indica la presión de vapor.
- 1 entrada analógica proveniente del transmisor de temperatura, que indica la temperatura de vapor.
- 1 entrada analógica proveniente del transmisor de flujo, que indica el flujo de vapor de salida.
- 1 entrada analógica proveniente del transmisor de flujo, que indica el flujo de agua de recirculación.
- 1 entrada analógica proveniente del transmisor de flujo, que indica el flujo de agua de alimentación.
- 1 entrada analógica proveniente del transmisor de posición del damper de by-pass.
- 1 salida analógica para controlar mediante un convertidor I/P, apertura o cierre del damper de by-pass.

Seleccionamos el ControlLogix 5580 de Allen-Bradley (Ver Figura 22). Este dispositivo ofrece alta capacidad para el manejo de múltiples variables, alto rendimiento, productividad y seguridad para ayudar a satisfacer las demandas

crecientes de máquinas y equipos inteligentes para la fabricación. Todos los controladores ControlLogix 5580 usan el entorno de diseño Studio 5000 como el marco estándar para la optimización de la productividad y reducción del tiempo de puesta en marcha. Este marco administra el movimiento integrado en EtherNet/IP para aplicaciones de movimiento a alta velocidad y soluciones de seguridad SIL2/PLd y SIL3/PLe. Estos controladores son ideales para aplicaciones que requieren comunicaciones de alto rendimiento, E/S y control de movimiento para 256 ejes como máximo.



**Figura 22.** ControlLogix 5580 de Allen-Bradley

**Fuente:** Rockwell Automation (2019)

#### **4.3. Fase III: Diseño de la automatización del proceso de cogeneración de vapor en la caldera N° 7 de Papeles Venezolanos C.A.**

Una vez concreto el diagnóstico de la situación actual y la evaluación de alternativas de instrumentación para los puntos críticos se procede con el diseño del sistema de control a implementar.

Se tiene a continuación las variables que intervienen en la producción de vapor

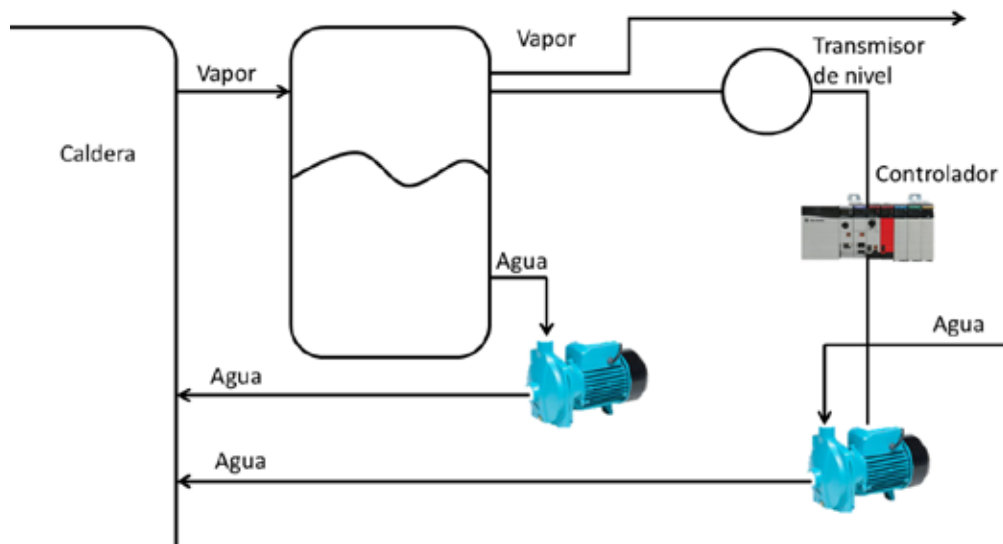
- Nivel del domo
- Presión de vapor
- Temperatura de vapor
- Flujo de recirculación de agua

- Posición del damper de by-pass
- Posición de los dampers de aislamiento
- Flujo de vapor
- Flujo de agua de alimentación

Estas variables se van a agrupar en dos lazos de control que conforman el sistema de automatización. Los llamaremos lazo de control de nivel de agua y lazo de control de producción de vapor.

#### 4.3.1. Lazo de Control de Nivel de Agua

Es el lazo que tiene como objetivo mantener el nivel de agua del domo de la caldera, para esto contamos con un transmisor de nivel cuya salida está normalizada y tiene un rango de 4mA a 20mA. En el lazo de regulación típico tenemos el elemento transmisor, el elemento controlador y el elemento final de control. El elemento controlador será nuestro autómatas programable o PLC y tendremos dos elementos finales de control los cuales son dos motores eléctricos que funcionan como bomba de recirculación y bomba de alimentación. Existen también dos transmisores de flujo que simplemente indicaran la funcionalidad o no de las bombas ya mencionadas.



**Figura 23.** Diagrama de Control de nivel de agua

**Fuente:** Leon, A. (2019)

En la figura 23 se muestra el diagrama de control asociado al lazo de control de nivel de agua.

El nivel de agua se mantiene alrededor del 50% la bomba de alimentación se enciende hasta que el nivel llega a 50%. La bomba de recirculación devuelve el agua condensada a la caldera hasta que el nivel llega a 40%, donde enciende nuevamente la bomba de alimentación.

#### **4.3.2. Lazo de Control de Producción de Vapor**

Para manejar este lazo de control, se utiliza un transmisor de presión calibrado de 0Psi a 300Psi, con una salida normalizada de 4mA a 20mA, el elemento de control es nuestro autómatas programable, y el elemento final de control es el damper by-pass, con un rango de apertura 0%-100%, es accionado a través de un posicionador bailey que recibe una señal neumática de 3Psi a 15Psi provenientes de un convertidor I/P cuya entrada está normalizada de 4mA a 20mA, además el damper de by-pass posee un transmisor de posición cuya salida está normalizada de 4mA a 20mA.

Ya que el sistema está linealizado debido a la configuración de los transmisores, el control requerido se puede representar como una relación de variables de manera lineal. Para desarrollar la lógica de control en el PLC primero definimos la función de transferencia que gobierna este sistema.

El damper de by-pass actúa como una válvula de control inverso, es decir relacionando la presión de vapor que se está produciendo y su posición de apertura; si está cerrado en la posición de apertura 0% La presión de vapor que se obtiene es la máxima 300Psi, por el contrario si se encuentra totalmente abierto en su posición de apertura 100% la presión de temperatura es despreciable aproximadamente 0Psi.

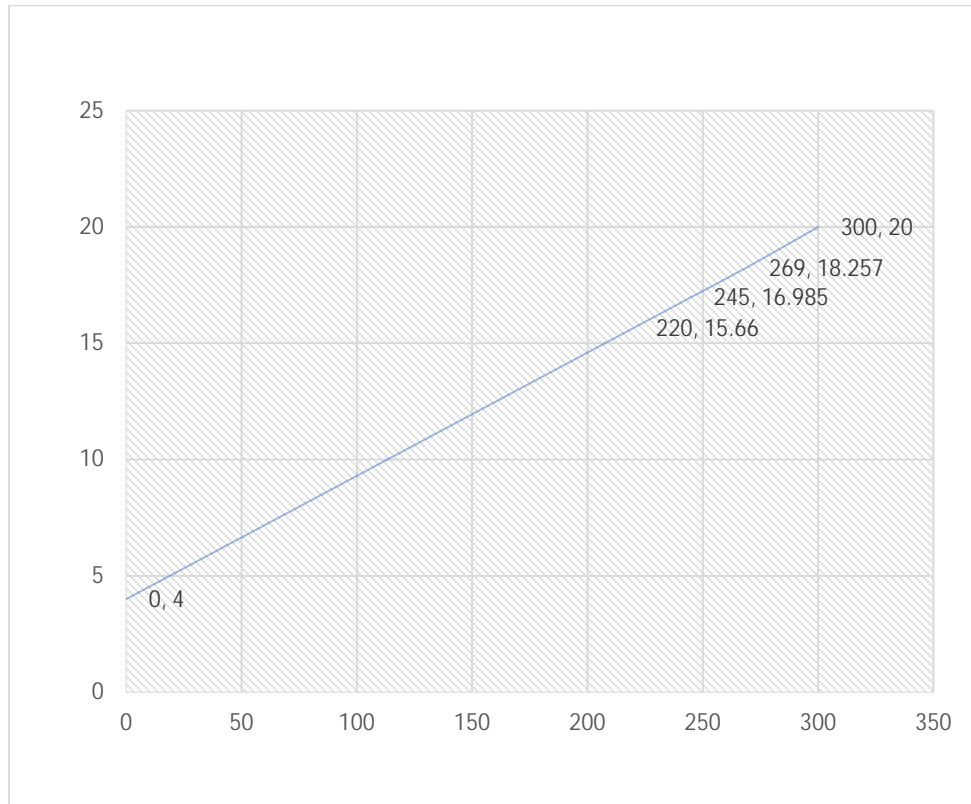
Tomando en cuenta que el valor de presión que se debe mantener es 245Psi, el transmisor de presión (P/I) funciona de la siguiente manera: Salida Y(mA), y entrada X(Psi). Si  $Y_{max}(20mA) = X_{max}(300Psi)$  y  $Y_{min}(4mA) = X_{min}(0Psi)$ . Se relacionan:

$$Y(mA) = m \cdot X(Psi) + Y_{min}$$

$$\text{Donde: } Y_{max} = m \cdot X_{max} + Y_{min}$$

$$m = \frac{20 - 4 \text{ (mA)}}{300 \text{ (Psi)}} = 0,053 \text{ mA/Psi}$$

Su comportamiento se muestra en el gráfico 2.



**Gráfico 2.** Comportamiento del transmisor de presión P/I

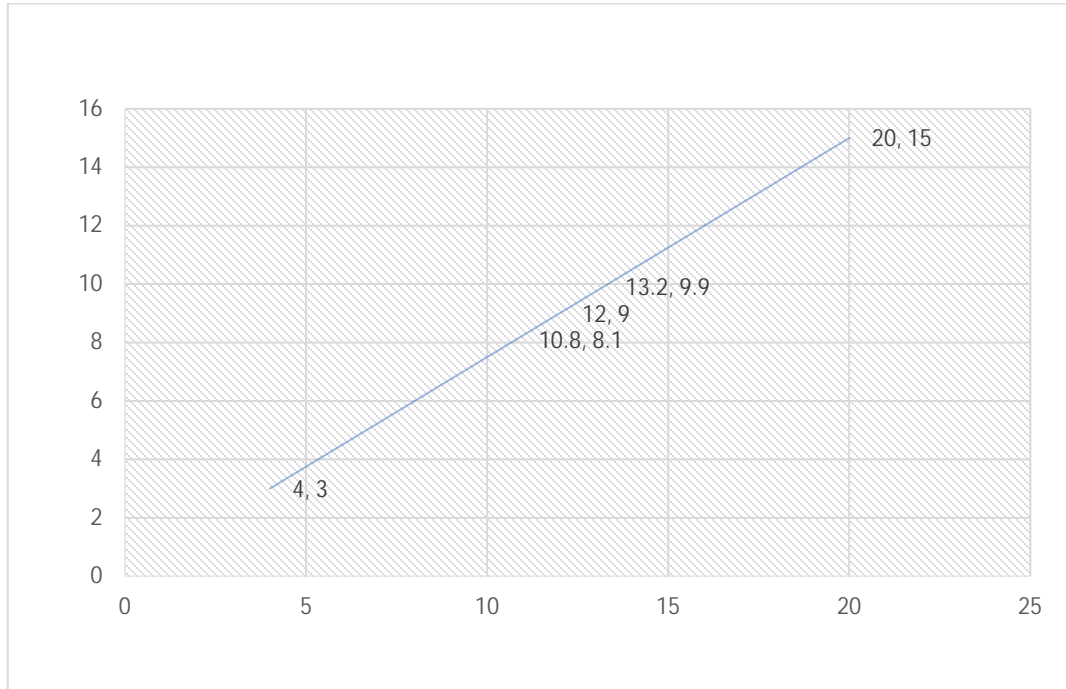
**Fuente:** Leon, A. (2019)

Por otro lado el convertidor I/P presenta en siguiente comportamiento, al igual que el transmisor de presión tiene una relación lineal

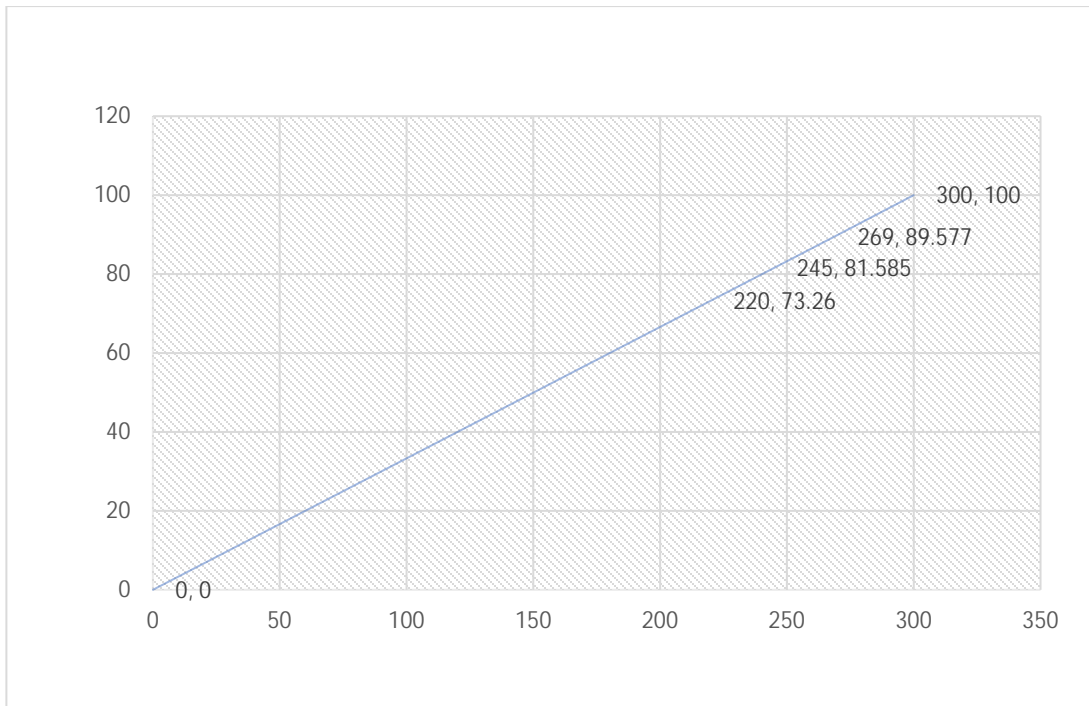
$$Y(\text{Psi}) = m \cdot X(\text{mA})$$

$$m = 0,75 \text{ Psi/mA}$$

A continuación, en el gráfico 3 se visualiza su comportamiento



**Gráfico 3. Convertidor I/P**  
Fuente: Leon, A. (2019)



**Gráfico 4. Comportamiento del Damper by-pass**  
Fuente: Leon, A. (2019)

En consecuencia, a lo mencionado inicialmente el Damper by-pass presenta una relación lineal inversa si comparamos su posición de apertura con la presión de vapor. Su relación viene dada por:

$$Y_{(\%) } = mX_{(\text{Psi})} \quad m = \frac{Y_{\text{max}}}{X_{\text{max}}} = \frac{100}{300} = 0,333 \text{ \%}/\text{Psi}$$

Así obtenemos que la función de transferencia es una constante

$$G_{(s)} = \frac{U_{(s)}}{E_{(s)}} = 0,333$$

El gráfico 4 representa el comportamiento del damper by-pass según la variable presión de vapor.

La acción proporcional tiene un inconveniente, que es la desviación permanente de la variable una vez estabilizada con relación al punto de consigna, denominada OFFSET. Una de verlo es suponer que inicialmente la variable coincide con el punto de consigna (50 °C) con una posición de la válvula de control del 50% de la carrera para un consumo de agua caliente de 100 l/h. Si se presenta un cambio de carga en el consumo de valor 200 l/h de agua caliente, es obvio que la temperatura final de equilibrio no coincidirá con la inicial de 50 °C, puesto que si no fuera así, por las características del control proporcional, la posición de la válvula sería la inicial (50%), lo cual es imposible, ya que en esta posición se ha presentado la disminución de temperatura inicial y existiría el absurdo de mantener la misma temperatura de salida con las válvula de control en la misma posición, dando el mismo paso de caudal de vapor tanto para el consumo de agua caliente en el régimen inicial como para el aumento de este consumo. De aquí que la temperatura aumentará o disminuirá con relación al punto de consigna hasta que el proceso se equilibre, para el cual, existirá una diferencia entre el punto de consigna y la variable

controlada (offset). Es decir, para mantener una presión de vapor constante es necesario establecer un controlador proporcional + integral. El control integral actúa cuando existe una desviación entre la variable y el punto de consigna, integrando dicha desviación en el tiempo y sumándola a la acción de la proporcional.

El valor de salida del controlador proporcional varía en razón proporcional al tiempo en que ha permanecido el error y la magnitud del mismo, su función de transferencia es:

$$\frac{U_{(s)}}{E_{(s)}} = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_N \cdot s} \right)$$

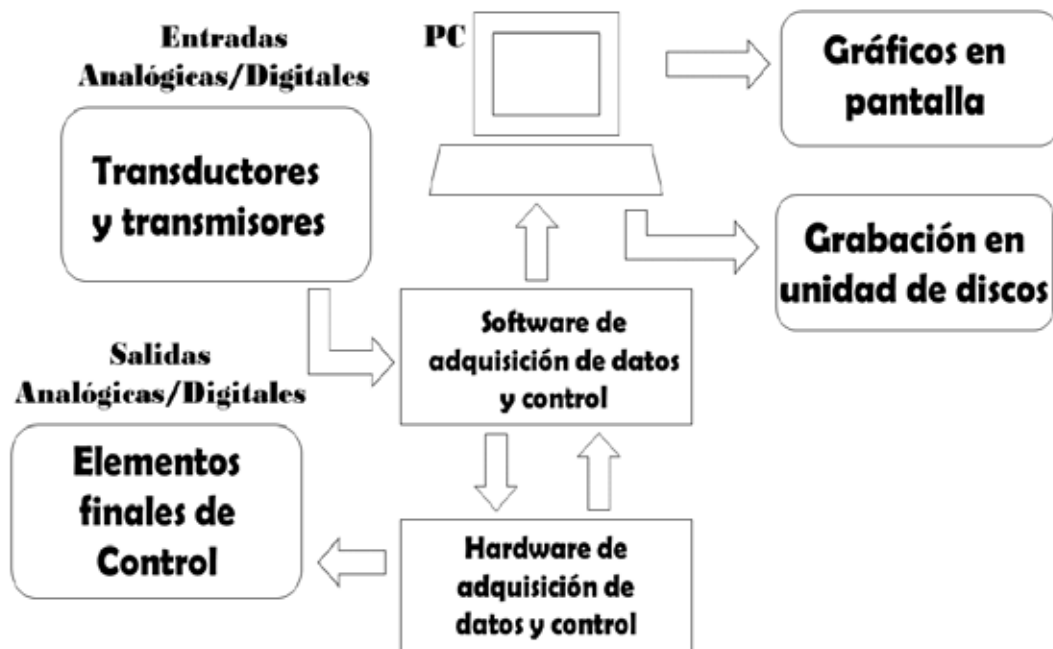
Donde  $K_p$  es la ganancia proporcional y  $T_N$  se denomina tiempo de acción integral. Ambos valores son ajustables. El tiempo integral regula la velocidad de acción de control, mientras que una modificación en  $K_p$  afecta tanto a la parte integral como a la parte proporcional de la acción de control.

Para controlar el sistema la ecuación de transferencia será:

$$\frac{U_{(s)}}{E_{(s)}} = \frac{(0,333) \cdot s + 0,037}{s}$$

#### 4.3.3. Diseño del Proceso de Control

El diagrama del proceso de control se muestra en la figura 24



**Figura 24.** Diagrama del proceso de control  
Fuente: Leon, A. (2019)

**Transmisores:**

**Cuadro 1. Transmisores**

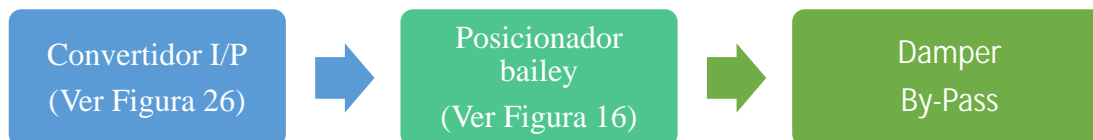
Transmisor	Servicio	Rango de Trabajo
Transmisor de nivel	Nivel de agua del domo	0-100%
Transmisor de flujo	Flujo de agua de la caldera	0-100mil Lb/H
Transmisor de flujo	Flujo de vapor	0-80mil Lb/H
Transmisor de presión	Presión de vapor	0-300 Psi
Transmisor de flujo	Flujo de agua de recirculación	o-2000 GPM

Fuente: Leon, A. (2019)

**Elemento de Control:**

ControlLogix 5580 de Allen-Bradley (Ver Figura 22).

**Elemento Final de Control:**



**Figura 25.** Elemento final de control.

Fuente: Leon, A. (2019)



**Figura 26.** Convertidor I/P

Fuente: Leon, A. (2019)

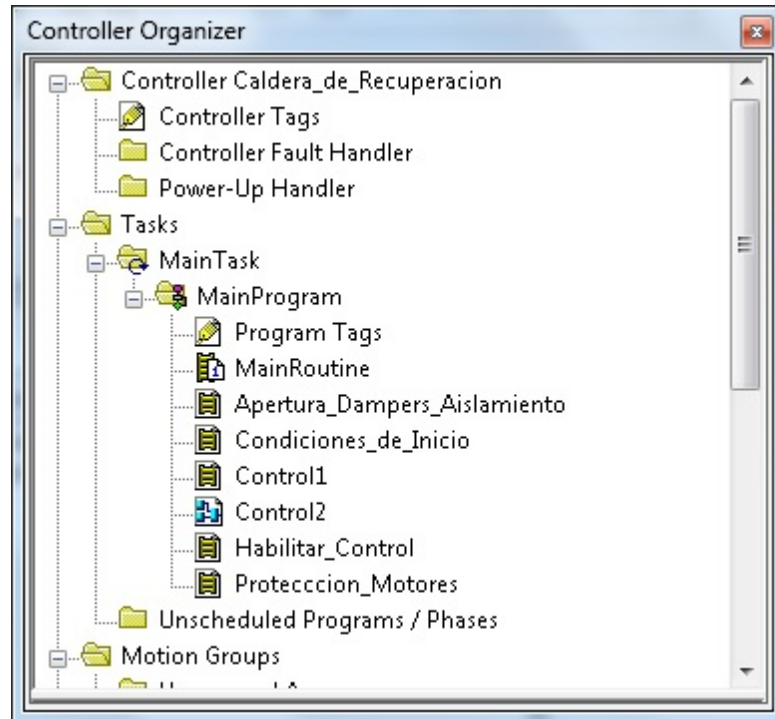
### **Desarrollo de la programación del controlador ya la interface hombre máquina:**

Para el desarrollo del programa se contó con el software que ofrece Rockwell Automatización. El Software RsLogix 5000/ Studio 5000 es una herramienta muy amigable utilizada para la configuración y programación de los Controladores Logix (Controllogix, Compactlogix, Softlogix y Drivelogix). Es un software bastante intuitivo, que permite el trabajo en equipo (colaborativo) para el desarrollo de aplicaciones, de manera de reducir el tiempo de puesta en marcha de un proyecto.

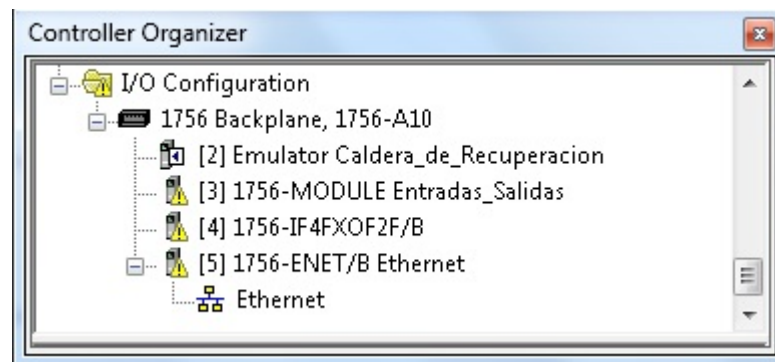
El Software RsLogix 5000 se llama así hasta la versión 20. A partir de la versión 21 toma el nombre de Studio 5000; a partir de la versión 28 se puede utilizar la aplicación para configurar y programar tanto los controladores Logix así como también los Panelview 5000 (Con el Studio 5000 viene incluido tanto el Logix Designer como el View Designer utilizado para la configuración y programación de los Panelview 5000). Junto al RsLogix 5000/ Studio 5000 viene incluido el RsLinx Lite que permite cargar y descargar los programas del computador a los controladores Logix (Controllogix, Compactlogix, Softlogix y Drivelogix).

Además para la realización de los displays de la interface se utilizó El software FactoryTalk View Machine Edition (ME) es una versátil aplicación de interface operador-máquina (HMI) que ofrece una solución robusta y dedicada para dispositivos de interface de operador a nivel de máquina.

En un principio se crea el Archivo de programa siguiendo una serie e pasos para configurar correctamente los modulos y la unidad de control con el RsLogix Emulate 5000, es un emulador que facilita el manejo de señales de entrada y salidas digitales. Unavez en el programa ya configurado se tiene el partado de organización del controlador, aquí se hubican las rutinas, subrutinas, los tags de variables y los módulos que se han configurado en el dispositivo. En las figuras 27 y 28 se observan los módulos, rutinas y subrutinas que componen este sistema.

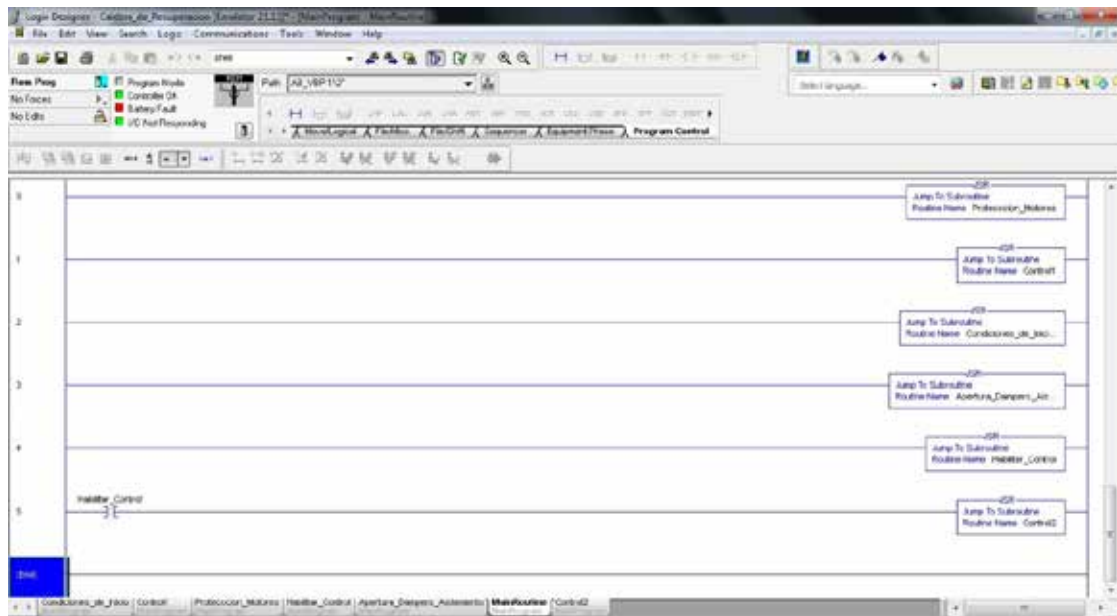


**Figura 27.** Rutinas y Subrutinas del sistema de control.  
**Fuente:** Leon, A. (2019)



**Figura 28.** Módulos del sistema de control  
**Fuente:** Leon, A. (2019)

En la rutina principal se tiene la ejecución de cada una de las subrutinas, hecho de esta manera para optimizar y tener un espacio de trabajo limpio. En la figura 29 se muestra la Rutina “Main”.



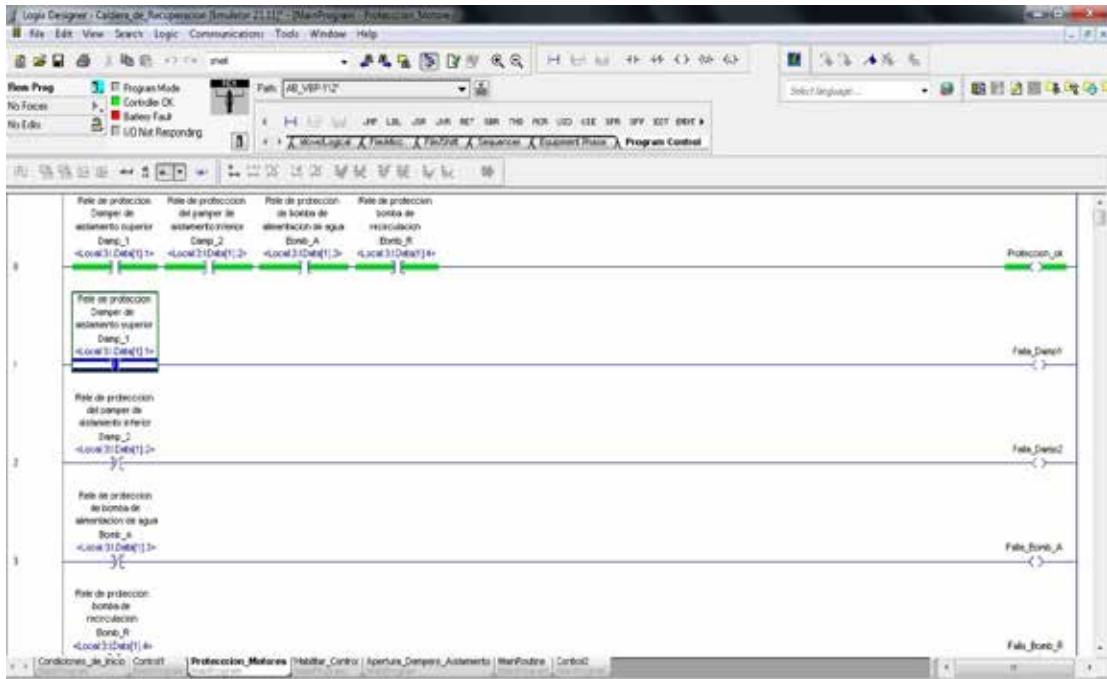
**Figura 29.** Rutina Principal.

Fuente: Leon, A. (2019)

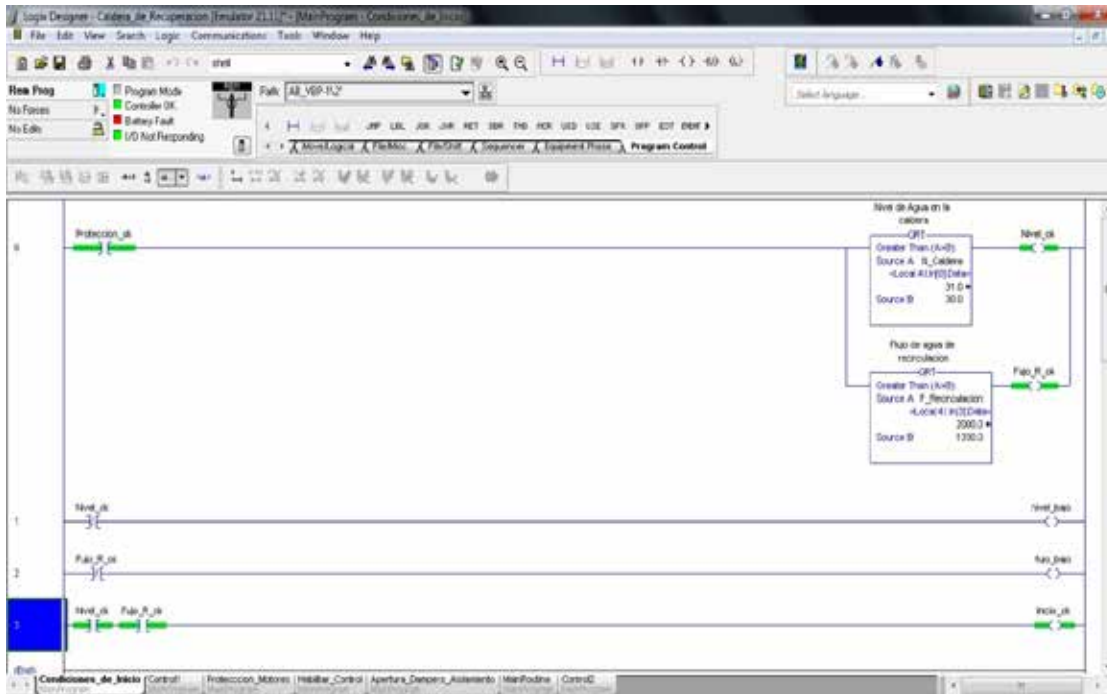
Así también se encuentra la subrutina de protección de motores, donde se hace el chequeo de las protecciones térmicas que poseen cada uno de los motores del sistema de control, los cuales son dos motores encargados de abrir/cerrar los dampers de aislamiento y dos bombas de agua que mantienen el nivel de agua en la caldera controlada. A continuación en la figura 30 se muestra la subrutina Protección de Motores.

En la figura 31 se muestra la subrutina Condiciones de inicio, donde se verifica que el nivel de agua de la caldera esté por encima del 30%, y además el flujo de recirculación tiene que ser mayor a 1330 GPM. Esto con la intención de proteger las tuberías internas de la caldera y su estructura integral.

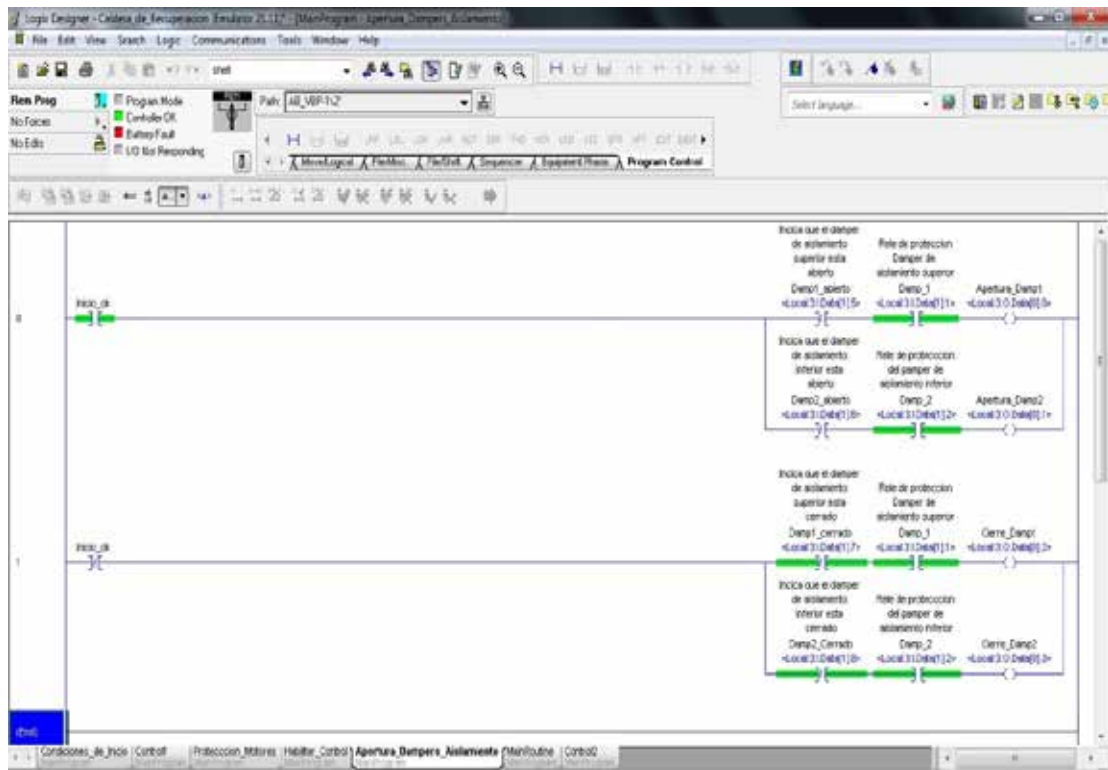
Antes de iniciar con el control se procede a abrir los dampers de aislamiento para que circule el calor necesario a través de la caldera, cada motor encargado de abrir o cerrar los dampers posee dos limitswitch, que indican su posición de apertura total o cierre. El damper superior tiene una apertura de 75° aproximadamente, mientras que el damper inferior abre 95°. En la figura 32 se muestra la lógica de control empleada en la apertura y cierre de los dampers de aislamiento.



**Figura 30.** Subrutina Protección de motores  
Fuente: Leon, A. (2019)



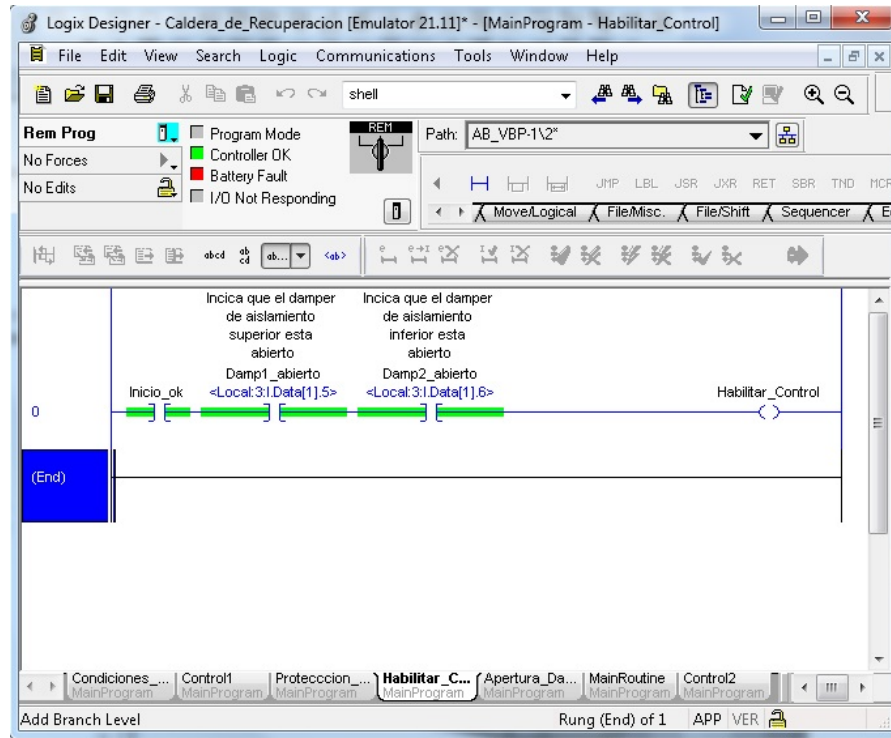
**Figura 31.** Subrutina Condiciones de Inicio  
Fuente: Leon, A. (2019)



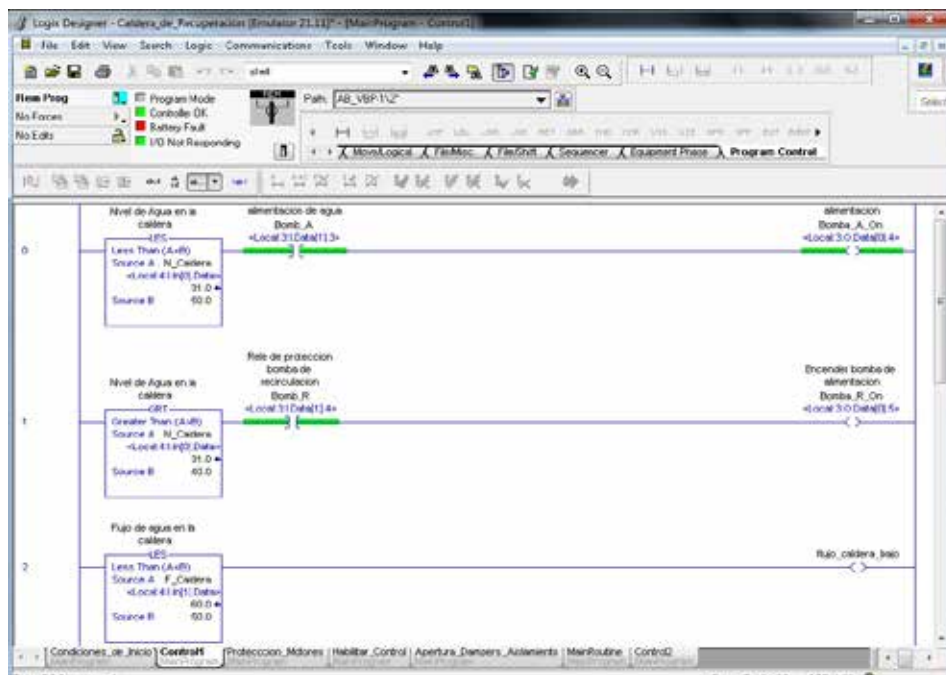
**Figura 32.** Subrutina de Apertura de los dampers de aislamiento.  
**Fuente:** Leon, A. (2019)

Una vez aperturados los dampers se verifica su posición y las condiciones de inicio para habilitar el control (Ver Figura 33). Continuamente, se tiene el lazo de control encargado de mantener un nivel de agua seguro para la caldera, en este lazo se utilizan la bomba de alimentación y la bomba de recirculación. La bomba de alimentación surte a la caldera de agua tratada proveniente de tranques de reciclado de agua que a través de un sistema de bombas hacen circular agua a todas las maquinarias de la empresa. El objetivo de las bombas de la caldera es mantener el nivel de agua entre un 40% y un 50% de su totalidad, en la figura 34 se muestra la programación del lazo de control de nivel de agua

Por último se procede a realizar el control de la presión de vapor, debido a que las variables que se manejan son netamente analógicas, se genera una subrutina de tipo bloque de función. En los bloques de función se representan y se manejan las variables analógicas en Rockwell automatización.

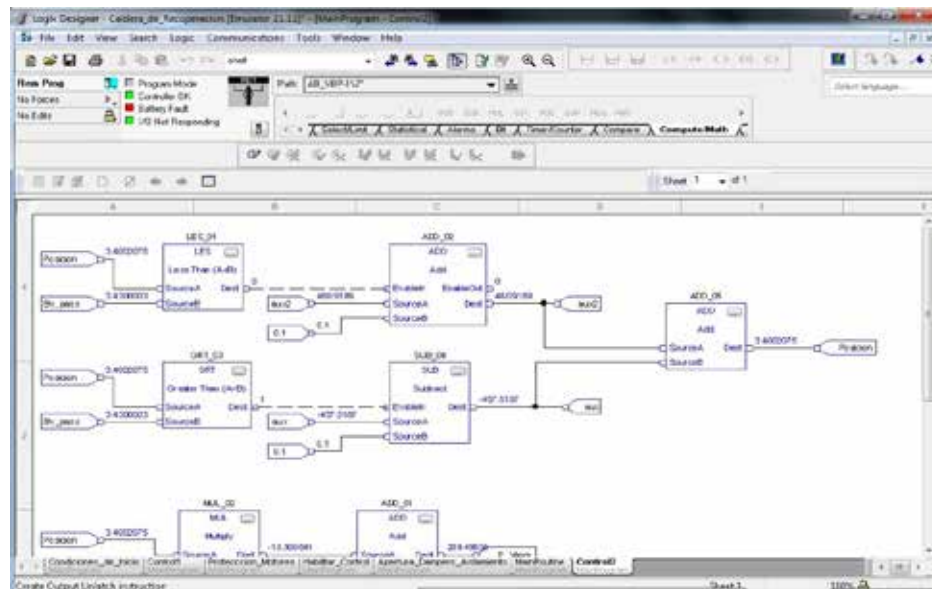


**Figura 33.** Subrutina Habilitar control.  
Fuente: Leon, A. (2019)

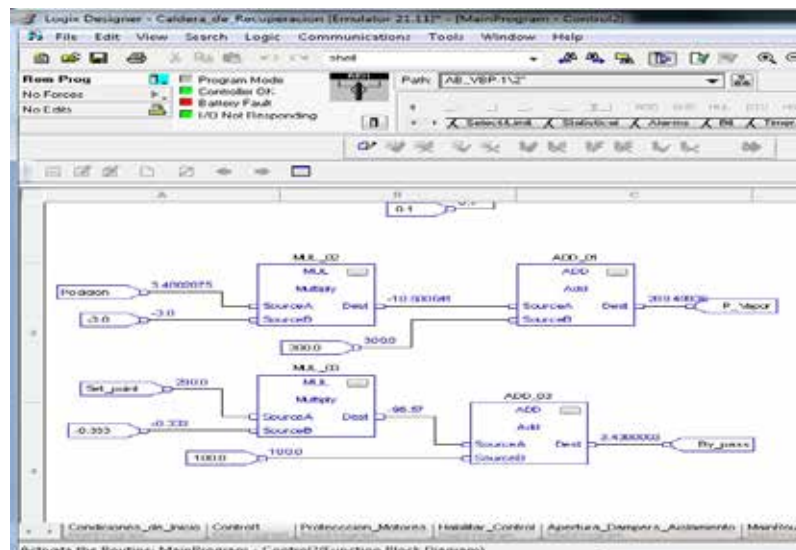


**Figura 34.** Subrutina Control 1  
Fuente: Leon, A. (2019)

La siguiente figura (Ver Figuras 35 y 36), muestra los bloques de función utilizados para establecer la relación necesaria que permita realizar el control de presión de vapor a través de la apertura o cierre del damper de By-pass. Este lazo de control corresponde al mencionado anteriormente para el damper de By-pass.

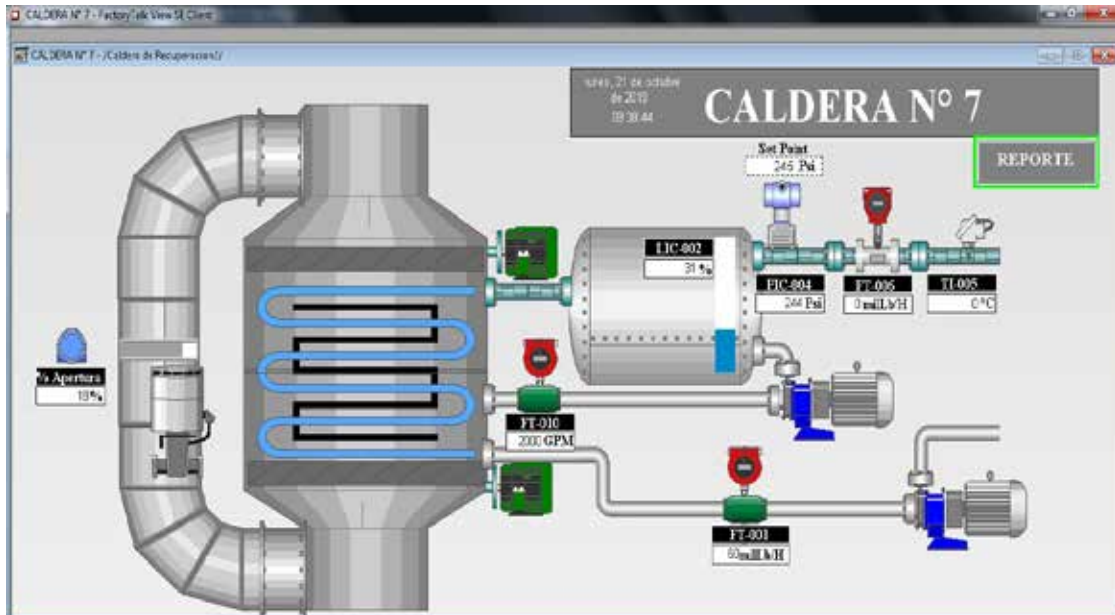


**Figura 35.** Subrutina de Control 2, 1/2  
Fuente: Leon, A.(2019)



**Figura 36.** Subrutina de Control 2, 2/2  
Fuente: Leon, A. (2019)

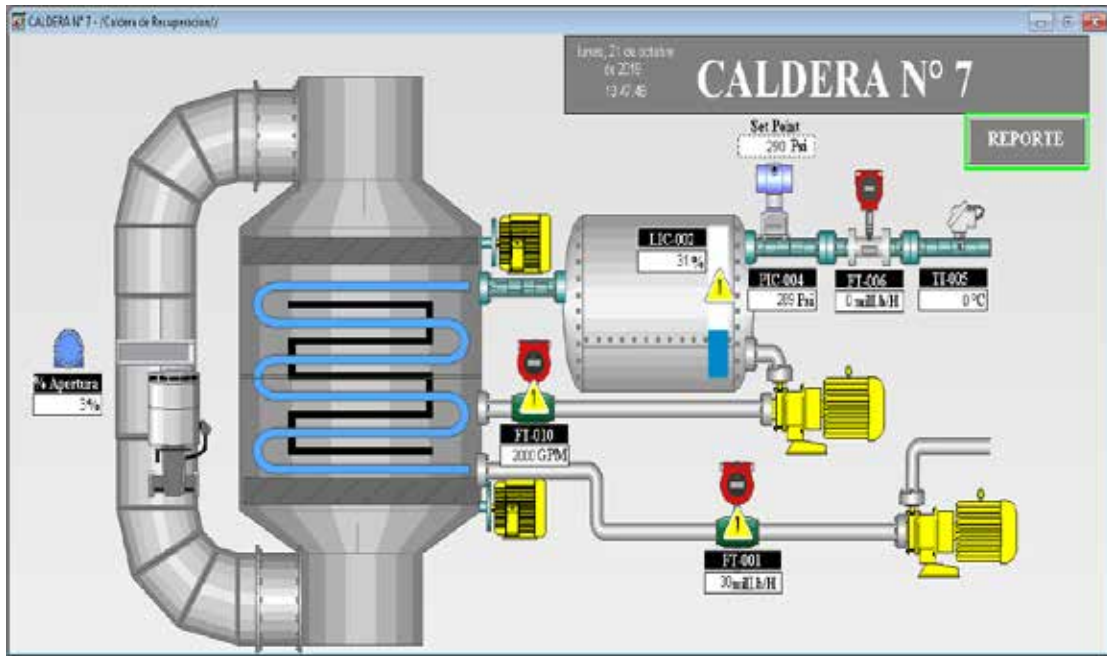
Finalmente, se presenta la intercace gráfica del sistema de control automatizado (Ver Figuras 37 y 38).



**Figura 37.** Pantalla principal del HMI  
Fuente: Leon, A. (2019)



**Figura 38.** Pantalla de totalización  
Fuente: Leon, A. (2019)



**Figura 39.** Representación de fallas en el HMI  
**Fuente:** Leon, A. (2019)

#### 4.4. Fase IV: Estudio de Factibilidad Ambiental, Social y Económica.

##### 4.4.1. Estudio de Factibilidad Ambiental

La emisión de residuos a la atmósfera y los propios procesos de combustión que se producen en las centrales térmicas tienen una incidencia importante sobre el medio ambiente. Para tratar de paliar, en la medida de lo posible, los daños que estas plantas provocan en el entorno natural, se incorporan a las instalaciones diversos elementos y sistemas.

Algunos tipos de centrales termoeléctricas contribuyen al efecto invernadero emitiendo dióxido de carbono. No es el caso de las centrales de energía solar térmica que al no quemar ningún combustible, no lo hacen. También hay que considerar que la masa de este gas emitida por unidad de energía producida no es la misma en todos los casos: el carbón se compone de carbono e impurezas. Casi todo el carbono que se quema se convierte en dióxido de carbono; también puede convertirse en monóxido de carbono si la combustión es pobre en oxígeno. En el caso del gas natural, por cada

átomo de carbono hay cuatro de hidrógeno que también producen energía al combinarse con oxígeno para convertirse en agua, por lo que contaminan menos por cada unidad de energía que producen y la emisión de gases perjudiciales procedentes de la combustión de impurezas -como los óxidos de azufre- es mucho menor.

El problema de la contaminación es máximo en el caso de las centrales termoeléctricas convencionales que utilizan como combustible carbón. Además, la combustión del carbón tiene como consecuencia la emisión de partículas y óxidos de azufre que contaminan en gran medida la atmósfera. En las de fueloil los niveles de emisión de estos contaminantes son menores, aunque ha de tenerse en cuenta la emisión de óxidos de azufre y hollines ácidos, prácticamente nulos en las plantas de gas.

En efecto el uso del combustible tiene un efecto negativo para el medio ambiente, la turbina ubicada en la empresa Papeles venezolanos ofrece un rendimiento del 50% sobre la energía primaria consumida. Aunque como se mencionó al inicio existen métodos que mejoran el porcentaje de rendimiento, como ejemplo la caldera de recuperación N° 7 de la misma empresa, la cuál es el objeto de estudio, este método permite un rendimiento más productivo y provechoso, ya que la turbina forma parte de la distribución eléctrica y la caldera de la distribución y producción de vapor.

Es evidente que en un largo periodo se tendrá funcionando dicha turbina, y es por esto que en conclusión se seguirá ocasionando un efecto negativo sobre el medio ambiente. Es decir, la caldera de recuperación no debe dejar de utilizarse en la producción y aprovechamiento mientras que la turbina esté operando, de lo contrario lo poco que se aplaca o reduce el daño al medio ambiente ya no se pondría en práctica.

#### **4.4.2. Estudio de Factibilidad Social**

La empresa Papeles Venezolanos C.A., se encuentra ubicada en una zona industrial, específicamente en la planta Guacara: carretera nacional Guacara – San Joaquín, Kilometro 1, Edo. Carabobo. Por lo cual no habría comunidad afectada por ruido o emisiones de la fábrica, la comunidad industrial adyacente se encuentra apartada de la planta.

Por otro lado, la empresa estaría otorgando un beneficio social dentro de su propia estructura organizacional, por cuanto la implementación de esta propuesta adecuaría el trabajo para todo un departamento que si bien no es de producción, el propio departamento de producción tiene dependencia de él.

#### **4.4.3. Estudio de Factibilidad Económica**

A lo largo del desarrollo de este proyecto se viene hablando de la dependencia que tiene el departamento de producción por parte del servicio que presta el departamento de generación de energía, y no es solo al departamento de producción es a un 80% de toda la planta, por lo que este estudio se basa en la posible falla que pueda tener o un posible imprevisto en la caldera, que ocasione un paro parcial significativo en la planta.

La factibilidad económica o rentabilidad. es un modelo o indicador que permite conocer de manera anticipada el resultado global de la operación d un proyecto, desde el punto de vista económico. Para poder comparar los proyectos, una vez que se estiman los costos e ingresos asociados a cada uno de ellos, es necesario resumir de alguna manera el atractivo económico de los mismos. De allí, la importancia de determinar la rentabilidad de los proyectos en la realización de los estudios económicos. Como todo indicador de eficiencia que relaciona los recursos utilizados en un proceso con la producción obtenida, en los modelos de rentabilidad se relacionan los recursos monetarios utilizados (costos) con las cantidades de dinero generadas (ingresos), con el objeto de cuantificar los potenciales beneficios o las pérdidas.

En virtud de las consecuentes paradas y fallas que se presentan en la caldera N° 7 de Papeles Venezolanos C.A., las cuales acarrearán pérdidas en tiempo y dinero. Se propone realizar una actualización de los equipos de control que intervienen en el proceso de la caldera. Dicha actualización requiere de una inversión inicial que se detalla a continuación en el cuadro 2.

Esta inversión que se requiere en la adquisición de nuevos equipos, reducirá las fallas, que son aproximadamente 5 por año, durante un tiempo de vida útil de 20 años. Cada falla en la caldera implica una parada, dicha parada necesita de 3 personas trabajando

en conjunto, para poner la caldera a producir vapor se necesitan dos días. La empresa invierte en cada persona al día 20 USD, lo que al final de dos días se convierte en una inversión de 120 USD, más una inversión en imprevistos estimada en 100 USD. Es decir, luego de instalar los nuevos equipos, evitando cinco fallas al año la empresa habrá ahorrado 1.100 USD/Año.

**Cuadro 2.** Presupuesto inversión inicial

<b>Cant.</b>	<b>Descripción</b>	<b>Marca</b>	<b>Precio USD</b>
1	Control Logix 5580	Allen-Bradey	680
1	Modulo Entradas Digitales 1756-Ib32	Allen-Bradey	110
1	Modulo Salidas Digitales 1756-OB32	Allen-Bradey	110
1	Modulo Entradas Analógicas 1756-IF8	Allen-Bradey	150
1	Modulo Salidas Analógicas 1756-OF4	Allen-Bradey	150
		Total	1.200

**Fuente:** Leon, A. (2019)

Estimando que en ahorros se destine el 80% en recuperar la inversión, El tiempo de retorno de inversión es de 1,4 años. Al culminar el tiempo de vida útil, la empresa habrá evitado gastos en paradas imprevistas, y aún poseerá equipos que tienen un bajo costo en mantenimiento.

## **CAPÍTULO V**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

#### **5.1. Conclusiones**

- La propuesta de la automatización del proceso de cogeneración de vapor de la caldera N° 7 de Papeles Venezolanos C.A., arrojó como resultado un sistema de control completamente capaz de mantener y regular correctamente la producción de vapor corrigiendo las fallas que se producían anteriormente.
- Se diseñó un sistema de control utilizando PLCs ControlLogix de Allen Bradley, los cuales por su capacidad cubren los requerimientos del control empleado y soportan comunicación Ethernet IP inalámbrica así como de la red de campo DeviceNet; este diseño se puede adaptar a determinadas especificaciones dependiendo de los clientes. El dispositivo autómatas programable, control logix es un sistema de altas prestaciones, y su capacidad está mas allá de este sistema de control propuesto, lo que le otorga al sistema una característica de escalabilidad y ampliación.
- Se considera una propuesta factible ambientalmente, basandonos en que aprovecha de manera eficiente los gases de combustión que de no tener dicho mecanismo de recuperación, los gases se expulsan directamente a la atmósfera ocasionando un impacto mayor al medio ambiente.
- La implementación del sistema propuesto en la empresa, reducirá los costos de mantenimiento y reparación. La inversión inicial del proyecto será de 1.200 USD, con un tiempo de retorno de inversión de 1,4 años.
- El uso de Ethernet IP en aplicaciones industriales está aumentando significativamente debido a las prestaciones, flexibilidad y facilidad de instalación que presenta; al soportar medios inalámbricos puede satisfacer las necesidades de comunicación de un proceso de control

## **5.2. Recomendaciones**

- Tener en consideración la implementación del sistema de automatización propuesto, con la intención de mejorar la producción de vapor y evitar paradas inesperadas en la caldera.
- Desarrollar a través de la lógica de programación un pequeño sistema de totalización y registro de, presión de vapor, flujo de vapor, flujo de agua de recirculación y flujo de agua de alimentación.
- Se recomienda comprobar el funcionamiento de cada elemento que se utilice antes de montar el sistema conjunto para la simulación. De igual manera se recomienda probar los sistemas uno por uno y luego en conjunto para descartar errores en el sistema.
- La comunicación es una de las partes fundamentales en el control de un proceso industrial. La seguridad, disponibilidad y rapidez de la información, para realizar un control en tiempo real del proceso, son las características fundamentales para un proceso de este tipo. El overhead necesita comunicación remota por lo que se recomiendan equipos basados en la norma IEEE 801.1g y el protocolo Ethernet IP.
- Se recomienda involucrarse y tener un conocimiento previo de cualquier proceso que se quiera controlar. Se debe conocer el funcionamiento de los equipos involucrados. La eficacia del rendimiento del sistema se da con un diseño adecuado, una buena implementación utilizando elementos de calidad, simulando y probando previamente el sistema, para tener un producto final depurado y listo para ser introducido en el mercado.

## REFERENCIAS

### **Bibliográficas**

- Arias, F. (2012). **El proyecto de investigación**. Caracas, Venezuela: Editorial Episteme, C.A.
- García, L. y Mijares, H. (2009) **Normas para la elaboración y presentación de los anteproyectos, proyectos y trabajos de grado**. Universidad José Antonio Páez. San Diego-Venezuela
- Hurtado, J. (2010). **Metodología de la investigación**. Caracas, Venezuela: Editorial Quirón.
- Ley N° 5.908. **Constitución de la República Bolivariana de Venezuela**. Caracas, Venezuela, 19 de febrero de 2009.
- Sabino, C. (1992). **El proceso de investigación**. Caracas, Venezuela: Editorial Panapo.
- Sabugal, S., y Gómez, F. (2006). **Centrales térmicas de ciclo combinado teoría y proyecto**. Madrid, España: Ediciones Díaz de Santos.

### **Electrónicas**

- Cobo, R. (2018). **El abc de la automatización**. Recuperado de <http://www.aie.cl/files/file/comites/ca/abc/hmi.pdf>
- Contaval (2016). **Control Proporcional Integral Derivativo (PID)**. Recuperado de <https://www.contaval.es/pid-control-proporcional-integral-derivativo/>
- Física Practica (2019). **Caudal**. Recuperado de <https://www.fisicapractica.com/caudal.php>
- Kerlinger, (1979) **Metodología de la Investigación**. Recuperado de [psicologiauv.com/porta1/RMIPE/vol\\_8.../investigaci3n\\_del\\_comportamiento.pdf](http://psicologiauv.com/porta1/RMIPE/vol_8.../investigaci3n_del_comportamiento.pdf)
- López, J. (2017). **Set point**. Recuperado de <https://glosarios.servidor-alicante.com/instrumentacion/set-point>

- Martínez, J. (2013). **Guía básica calderas industriales eficientes**. Recuperado de <https://www.fenercom.com/pdf/publicaciones/Guia-basica-calderas-industriales-eficientes-fenercom-2013.pdf>
- Mecafenix, F. (2017). **Conceptos básicos de la instrumentación industrial**. Recuperado de <https://www.ingmecafenix.com/electricidad-industrial/instrumentacion-conceptos-basicos/>
- NEMA (2013). **¿Qué es un PLC?**. Recuperado de <https://www.nema.org>
- Omega Engineering (2017). **La importancia de la instrumentación**. Recuperado de <https://cl.omega.com/prodinfo/instrumentacion.html>
- OPEXenergy. **Ciclos Combinados**. Recuperado de [http://opex-energy.com/ciclos/calderas\\_hrsg.html](http://opex-energy.com/ciclos/calderas_hrsg.html)
- RAING (2019). **Vapor Saturado**. Recuperado de <http://diccionario.raing.es/es/lema/vapor-saturado>
- Rockwell Automation (2019). **Controladores programables de automatización**. Recuperado de [https://www.rockwellautomation.com/es\\_VE/products/programmable-controllers/overview.page?](https://www.rockwellautomation.com/es_VE/products/programmable-controllers/overview.page?)
- Ronaldo, A. (2016). **Definición: Calderas**. Recuperado de <https://todosobrecalderas.wordpress.com/2016/09/27/definicion-calderas/>
- Tamayo y Tamayo (2003). **El Proceso de la Investigación Científica**. Recuperado de <https://es.scribd.com/.../Tamayo-y-Tamayo-Mario-El-Proceso-de-la-Investigacion-Cientifica>