



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

**CONTROL DE NIVEL DEL DOMO DE UNA CALDERA ACUOTUBULAR  
UTILIZADA EN LA INDUSTRIA TEXTIL Y COGENERACIÓN, UTILIZANDO  
INSTRUMENTACIÓN Y MEDICIÓN DE TRES ELEMENTOS**

**Noé Daniel Yax Tzul**

Asesorado por el Ing. Carlos Aníbal Chicojay Coloma

Guatemala, noviembre de 2015

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**CONTROL DE NIVEL DEL DOMO DE UNA CALDERA ACUOTUBULAR  
UTILIZADA EN LA INDUSTRIA TEXTIL Y COGENERACIÓN, UTILIZANDO  
INSTRUMENTACIÓN Y MEDICIÓN DE TRES ELEMENTOS**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**NOÉ DANIEL YAX TZUL**

ASESORADO POR EL ING. CARLOS ANÍBAL CHICOJAY COLOMA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO MECÁNICO**

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2015

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Raúl Eduardo Ticún Córdova
VOCAL V	Br. Henry Fernando Duarte García
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

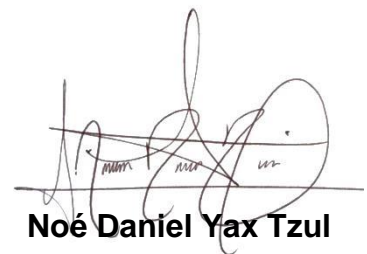
DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Víctor Manuel Ruiz Hernández
EXAMINADOR	Ing. Roberto Guzmán Ortíz
EXAMINADOR	Ing. Milton Alexander Fuentes Orozco
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

## **HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

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

### **CONTROL DE NIVEL DEL DOMO DE UNA CALDERA ACUOTUBULAR UTILIZADA EN LA INDUSTRIA TEXTIL Y COGENERACIÓN, UTILIZANDO INSTRUMENTACIÓN Y MEDICIÓN DE TRES ELEMENTOS**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica, con fecha 17 de marzo de 2015.



**Noé Daniel Yax Tzul**

Guatemala, 24 de septiembre 2015

Ingeniero

Roberto Guzmán Ortiz

Director

Escuela de Ingeniería Mecánica

Facultad de Ingeniería

Universidad de San Carlos de Guatemala

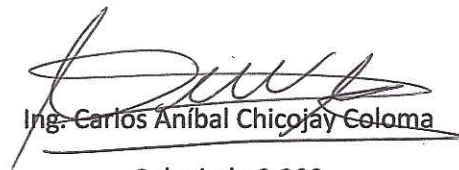
Ing. Guzmán:

Atentamente me dirijo a usted para someter a su consideración el Trabajo de Graduación del estudiante, **NOÉ DANIEL YAX TZUL**, No. De carnet **2007-14594**, previo a obtener el título de Ingeniero Mecánico.

El trabajo se titula: **CONTROL DE NIVEL DEL DOMO DE UNA CALDERA ACUOTUBULAR UTILIZADA EN LA INDUSTRIA TEXTIL Y COGENERACIÓN, UTILIZANDO INSTRUMENTACION Y MEDICION DE TRES ELEMENTOS**, el cual he asesorado y revisado; considerando que llena satisfactoriamente los requisitos por lo cual recomiendo su aprobación.

En tal virtud lo doy por aprobado, solicitándole darle el tramite respectivo.

Atentamente

  
Ing. Carlos Anibal Chicojay Coloma

Colegiado 2,309

*Carlos Anibal Chicojay Coloma*  
INGENIERO MECANICO  
Colegiado No. 2309



**USAC**

TRICENTENARIA  
Universidad de San Carlos de Guatemala

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería Mecánica

Ref.E.I.M.281.2015

El Coordinador del Área Térmica de la Escuela de Ingeniería Mecánica, luego de conocer el dictamen del Asesor y habiendo revisado en su totalidad el trabajo de graduación titulado: **CONTROL DE NIVEL DEL DOMO DE UNA CALDERA ACUOTUBULAR UTILIZADA EN LA INDUSTRIA TEXTIL Y COGENERACIÓN, UTILIZANDO INSTRUMENTACIÓN Y MEDICIÓN DE TRES ELEMENTOS** del estudiante **Noé Daniel Yax Tzul**, carné No. **2007-14594** recomienda su aprobación.

***"Id y Enseñad a Todos"***

  
Ing. Julio César Campos Paiz  
Coordinador del Área Térmica  
Escuela de Ingeniería Mecánica



Guatemala, septiembre de 2015

MA Ing. Julio César Campos Paiz  
Ingeniero Mecánico  
Colegiado No. 2701



**USAC**

TRICENTENARIA  
Universidad de San Carlos de Guatemala

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería Mecánica

Ref.E.I.M.341.2015

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica, de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor y con la aprobación del Coordinador del Área Térmica del trabajo de graduación titulado: **CONTROL DE NIVEL DEL DOMO DE UNA CALDERA ACUOTUBULAR UTILIZADA EN LA INDUSTRIA TEXTIL Y COGENERACIÓN, UTILIZANDO INSTRUMENTACIÓN Y MEDICIÓN DE TRES ELEMENTOS** del estudiante **Noé Daniel Yax Tzul** Carné No. **2007-14594** y luego de haberlo revisado en su totalidad, procede a la autorización del mismo.

**"Id y Enseñad a Todos"**

  
Ing. Roberto Guzmán Ortiz  
Director  
Escuela de Ingeniería Mecánica



Guatemala, noviembre de 2015

/aej

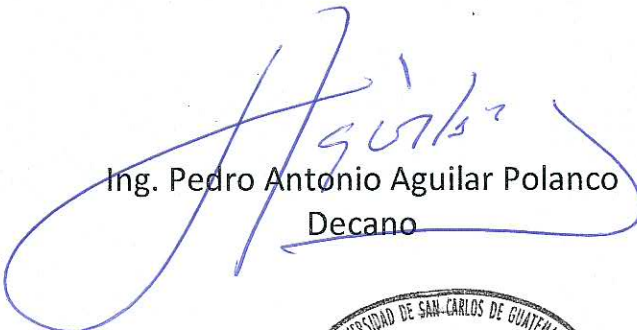




DTG. 584.2015

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica, al Trabajo de Graduación titulado: **CONTROL DE NIVEL DEL DOMO DE UNA CALDERA ACUOTUBULAR UTILIZADA EN LA INDUSTRIA TEXTIL Y COGENERACIÓN, UTILIZANDO INSTRUMENTACIÓN Y MEDICIÓN DE TRES ELEMENTOS,** presentado por el estudiante universitario: **Noé Daniel Yax Tzul,** y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

  
Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco  
Decano

Guatemala, noviembre de 2015

/gdech





## **ACTO QUE DEDICO A:**

<b>Dios</b>	“No a nosotros, oh Señor, no a nosotros sino a tu nombre le corresponde toda la gloria, por tu amor inagotable y tu fidelidad”. Salmo 115:1.
<b>Mi esposa</b>	Glenda Patricia Guzmán de Yax, mi ayuda idónea y quien me ha acompañado en esta recta final.
<b>Mi hijo</b>	Josué Daniel, quien ha añadido alegría a nuestra vida y es un motivo más de superación.
<b>Mis padres</b>	Lic. Julio Morataya y Gladys de Morataya, quienes me han brindaron su ayuda y apoyo incondicional en todo momento.
<b>Mis tíos</b>	Marlon Vásquez y Licda. Anabella de Vásquez, sus constantes muestras de amor me enseñaron grandes lecciones.
<b>Mi abuela</b>	Su incondicional apoyo e invaluable amor me ayudaron en cada momento de esta trayectoria.
<b>Mis hermanos</b>	Eunice y Julio Yax Tzul, por su apoyo moral y ayuda cuando más la necesitaba.

**Mis primos**

Karen y Marlon Yax, a quienes considero mis hermanos y con los que hemos vivido grandes momentos.

**Mi sobrina**

Marcela Yax, quien ha añadido alegrías desde el primer día que se presentó en nuestras vidas.

## **AGRADECIMIENTOS A:**

<b>Dios</b>	Fuente inagotable de sabiduría, gracias a Él he concluido una carrera más.
<b>Universidad de San Carlos de Guatemala</b>	Alma máter que me abrió sus puertas para aprovechar lo mejor de ella.
<b>Facultad de Ingeniería</b>	Facultad que deposita conocimientos en aquellos que hemos tenido el privilegio de pasar por sus aulas.
<b>Mi esposa e hijo</b>	Pilares importantes en mi vida, gracias por su paciencia y amor incondicional.
<b>Mis padres</b>	Porque de los grandes sacrificios se obtienen grandes recompensas.
<b>Mis tíos</b>	Su apoyo y amor incondicional han influido en mi formación personal.
<b>Mi abuela</b>	Cada detalle y atención influyeron directamente en el transcurso de mi formación académica.
<b>Esinsa</b>	Empresa que permitió el inicio de mi formación profesional y donde me permitieron realizar este trabajo.

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS .....	VII
GLOSARIO .....	IX
RESUMEN.....	XIII
OBJETIVOS.....	XV
INTRODUCCIÓN .....	XVII
1. ANTECEDENTES .....	1
1.1. Vapor de agua .....	1
1.2. Producción de vapor por medio de intercambiadores de calor.....	5
1.3. Control del proceso de generación de vapor .....	9
2. CONCEPTOS BÁSICOS DE LAS CALDERAS ACUOTUBULARES .....	13
2.1. Principio de funcionamiento de calderas acuotubulares.....	13
2.1.1. Alimentación de agua .....	13
2.1.2. Transferencia de calor .....	17
2.1.3. Proceso de vapor.....	21
2.2. Uso de calderas acuotubulares .....	22
2.2.1. Cogeneración .....	23
2.2.2. Calentamiento.....	24
2.3. Ciclos termodinámicos de una caldera acuotubular .....	26
2.3.1. Rankine simple .....	26
2.3.2. Rankine con sobrecalentamiento.....	28
2.3.3. Rankine recalentado.....	31

2.3.4.	Rankine recuperativo .....	32
2.3.5.	Eficiencia .....	34
3.	PRODUCCIÓN DE VAPOR EN CALDERAS ACUOTUBULARES .....	35
3.1.	Cambio de fase de agua de alimentación .....	35
3.2.	Mezcla de vapor de agua (vapor húmedo) y calidad del vapor .....	36
3.3.	Vapor saturado.....	37
3.3.1.	Obtención .....	37
3.3.2.	Usos .....	38
3.3.3.	Características .....	38
3.4.	Vapor sobrecalentado .....	39
3.4.1.	Obtención .....	39
3.4.2.	Usos .....	40
3.4.3.	Características .....	40
3.5.	Balance de masa agua-vapor .....	40
4.	CONTROL DEL PROCESO PARA LA PRODUCCIÓN DE VAPOR.....	45
4.1.	Filosofía de control y descripción del control del nivel del domo .....	45
4.1.1.	Descripción del control del proceso.....	48
4.2.	Conocimientos básicos de control.....	50
4.2.1.	Variable de proceso (PV) .....	50
4.2.2.	Punto de consigna.....	51
4.2.3.	Variable manipulada.....	52
4.3.	Instrumentación.....	53
4.3.1.	Campo de medida (rango).....	53
4.3.2.	Alcance ( <i>span</i> ) .....	54
4.3.3.	Error .....	54

4.3.4.	Exactitud .....	55
4.3.5.	Precisión .....	55
4.3.6.	Variables medidas .....	55
4.3.6.1.	Nivel.....	55
4.3.6.2.	Flujo.....	56
4.3.6.3.	Temperatura .....	57
4.3.6.4.	Presión .....	58
4.3.7.	Selección de tecnología a utilizar .....	59
4.3.7.1.	Presión diferencial .....	59
4.3.7.2.	Software FE-Sizer.....	63
4.3.7.3.	Termocoplas.....	69
4.4.	Elementos finales de control y válvulas automáticas.....	71
4.4.1.	Válvulas encendido-apagado ( <i>on/ff</i> ) .....	71
4.4.2.	Válvulas de control .....	72
4.4.2.1.	Válvulas tipo globo.....	72
4.4.2.2.	Válvulas tipo bola.....	73
4.4.2.3.	Válvulas de mariposa .....	74
4.4.3.	Selección y dimensionamiento de la válvula a utilizar en el proceso.....	74
4.4.3.1.	Válvula de globo .....	75
4.4.3.2.	Actuador .....	76
4.4.3.3.	Posicionador .....	76
4.5.	Tipos de control .....	77
4.5.1.	Control todo nada ( <i>on-off</i> ).....	77
4.5.2.	Control regulado .....	78
4.5.3.	Control PID .....	79
4.5.3.1.	Acción proporcional .....	80
4.5.3.2.	Acción integral .....	81
4.5.3.3.	Acción derivativa.....	82

4.6.	Seguridad de la caldera .....	83
4.7.	Costos .....	88
CONCLUSIONES.....		93
RECOMENDACIONES .....		95
BIBLIOGRAFÍA.....		97



# ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

## FIGURAS

1.	Diagrama presión – entalpía .....	3
2.	Propiedades de vapor saturado y líquido saturado .....	4
3.	Recorrido de los gases de escape .....	6
4.	Disposición de tubería de alojamiento de agua.....	8
5.	Ciclo de Rankine simple.....	11
6.	Recorrido de agua de alimentación para caldera .....	17
7.	Transferencia de calor por conducción .....	18
8.	Transferencia de calor por convección.....	19
9.	Transferencia de calor hacia la zona de tubos.....	20
10.	Ciclo completo de una caldera acuotubular .....	21
11.	Proceso de producción de vapor.....	22
12.	Ciclo básico de Rankine para cogeneración .....	24
13.	Ciclo básico de Rankine.....	27
14.	Ciclo de Rankine con sobrecalentamiento .....	29
15.	Daños ocasionados por cavitación en una turbina de vapor .....	30
16.	Ciclo de Rankine con recalentamiento .....	32
17.	Recuperación de calor con economizador .....	33
18.	Diagrama de cambio de fase líquido – vapor .....	36
19.	Diagrama de región de vapor saturado .....	38
20.	Diagrama de región de vapor sobrecalentado .....	39
21.	Diagrama PID de proceso para control de tres elementos.....	43
22.	Efecto de arrastre de agua por demanda alta de vapor .....	47
23.	Esquema de control básico .....	53

24.	Teorema de Bernoulli.....	60
25.	Medición de presión diferencial .....	61
26.	Placa de orificio concéntrica .....	61
27.	Cálculo de placa de orificio para medición de caudal de agua .....	64
28.	Diseño e instalación de placa de orificio para medición de flujo de agua .....	65
29.	Software FE-Sizer para dimensionar placas de orificio.....	66
30.	Cálculo de placa de orificio para medición de caudal de vapor sobrecalentado .....	67
31.	Diseño e instalación de placa de orificio para medición de flujo de vapor sobrecalentado .....	68
32.	Software FE-Sizer para dimensionar placas de orificio.....	69
33.	Esquema de generación de señal de termocopla .....	70
34.	Conexión de transmisor para sensor de temperatura termocopla .....	71
35.	Control <i>on-off</i> para una válvula en función de la temperatura .....	78
36.	Control análogo flujo de agua <i>versus</i> apertura de la válvula .....	78
37.	Algoritmo de control PID .....	79
38.	Control proporcional con ganancia igual a 2.....	80
39.	Funcionamiento control PID.....	83
40.	Montaje de conexión entre el domo y la columna de agua .....	85
41.	Distancia de electrodos para columna de agua de seguridad .....	85
42.	Dispositivo <i>interlock</i> de disparo por nivel alto y nivel bajo .....	87

## TABLAS

I.	Límites recomendados de agua de alimentación basados en presiones de operación.....	16
----	--	----

## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
<b>H<sub>2</sub>O</b>	Agua
<b>BTU</b>	British Thermal Unit
<b>CV</b>	Coeficiente de caudal
<b>\$/año</b>	Dólares al año
<b>\$/Ton</b>	Dólares por tonelada
<b>U</b>	Energía interna
<b>H</b>	Entalpía
<b>S</b>	Entropía
<b>GPM</b>	Galones por minuto
<b>°C</b>	Grados Celsius
<b>kCal</b>	Kilocalorías
<b>PSI</b>	Libras por pulgada cuadrada
<b>Lb/h</b>	Libras por hora
<b>m<sup>3</sup>/kg</b>	Metros cúbicos por kilogramo
<b>mA</b>	Miliamperios
<b>ft<sup>3</sup>/Lbm</b>	Pies cúbicos por libra masa
<b>pH</b>	Potencial de hidrógeno
<b>SP</b>	Punto de consigna
<b>Ton/año</b>	Toneladas por año
<b>Ton/día</b>	Toneladas por día
<b>Ton/h</b>	Toneladas por hora
<b>P</b>	Valor proporcional
<b>I</b>	Valor integral

**D**  
**W**

Valor derivativo  
Watt

## GLOSARIO

<b>Absorbedor</b>	Es un dispositivo utilizado para atrapar cenizas por medio de la humidificación.
<b>ASME</b>	Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos.
<b>Cabezal de vapor</b>	Equipo utilizado para recolectar y transportar vapor como parte de los distintos equipos utilizados en la planta.
<b>Caudal nominal</b>	Es el caudal de operación bajo condiciones normales de producción de vapor.
<b>Cavitación</b>	Efecto hidrodinámico que se produce siempre que la presión en algún punto o zona de la corriente de un líquido desciende por debajo de la presión de vaporización.
<b>Colector</b>	Equipo utilizado para unir el vapor proveniente de diversas calderas.
<b>Condensado</b>	Líquido formado cuando el vapor pasa de estado gaseoso a estado líquido, esto debido a la pérdida de calor.

<b>Condición crítica</b>	Valor de alguna variable de proceso que indica que se ha entrado en zona de peligro.
<b>Conductividad térmica</b>	Propiedad física que mide la capacidad de conducción de calor.
<b>Controlador</b>	Elemento que controla la lógica de funcionamiento de un proceso.
<b>Curva característica</b>	Describe el comportamiento de una válvula basándose en el porcentaje de apertura y el coeficiente de caudal.
<b>Datos de placa</b>	Conjunto de datos propio de cada máquina, que indica parámetros de funcionamiento (temperatura, presión, caudal).
<b>Elemento final</b>	Dispositivo mecánico utilizado para manipular la variable de proceso y obtener los valores deseados.
<b>Energía calorífica</b>	Energía que se libera en forma de calor, utilizada para determinar procesos de combustión.
<b>Filosofía de control</b>	Documento que especifica, de manera general, el concepto del sistema a controlar.

<b>Líquido comprimido</b>	Líquido que está sometido a una presión mayor que la presión de equilibrio líquido – vapor, este líquido no está a punto de evaporarse.
<b>Líquido saturado</b>	Líquido en el que su estado permite que esté a punto de evaporarse.
<b>Precipitador electrostático</b>	Dispositivo utilizado para captar cenizas provenientes de la combustión por medio de ionización, atrayéndolas por una carga electrostática inducida.
<b>Presión diferencial</b>	La diferencia de las medidas tomadas entre dos puntos, aguas arriba y aguas debajo de un determinado equipo.
<b>Proceso isentrópico</b>	Proceso en el cual la entropía del fluido que forma parte de un sistema permanece constante.
<b>Proceso térmico</b>	Procesos termodinámicos con diferentes estados y diferentes características.
<b>Puesta en marcha</b>	Proceso en el cual se inicia la operación de un determinado proceso.
<b>Punto de consigna</b>	Valor deseado de una variable.
<b>Resistividad térmica</b>	Propiedad física de los materiales que mide la capacidad de oponerse al paso del calor.



<b>Selector reductor</b>	Dispositivo que utiliza un catalizador de platino, para la reducción química de moléculas de NO <sub>x</sub> .
<b>Señal análoga</b>	Tipo de señal generada por un fenómeno electromagnético que varía su amplitud y periodo en función del tiempo, posee diversos valores.
<b>Señal digital</b>	Tipo de señal generada por un fenómeno electromagnético, esta posee valores discretos.
<b>Tratamiento químico</b>	Procedimiento mediante el cual se agregan agentes químicos al agua de caldera, para eliminar fenómenos de corrosión y deterioro de la caldera.
<b>Trim</b>	Conjunto de partes de una válvula que están en contacto directo con el fluido.
<b>Turbina de vapor</b>	Turbomáquina que transforma la energía de un fluido (vapor) en energía mecánica.
<b>Vapor de baja calidad</b>	Vapor húmedo con un alto contenido de agua.
<b>Vapor sobrecalentad</b>	Vapor utilizado para el proceso de cogeneración, tiene como características su alta temperatura.

## RESUMEN

La producción de vapor en la industria es un proceso muy necesario y con un costo alto, por tal motivo, es necesario optimizar los recursos disponibles a través de su mejor aprovechamiento. De aquí surge la necesidad de implementar una operación automática, pues esta tiene ventajas sobre una operación manual.

Para el caso de estudio, se generará vapor en una caldera acuotubular, la cual opera bajo ciclos termodinámicos conocidos. El vapor generado en dicha caldera es utilizado en la industria textil para procesos que requieren vapor continuo, además, también se utiliza vapor para generar energía eléctrica, misma que es utilizada para abastecer a la planta. Ya que implementar un control automático en la operación de la caldera requiere conocimientos de instrumentación y control, se amplía el tema acerca de la selección adecuada de instrumentos y elementos finales de control, elementos que sirven para controlar y proteger la caldera.

A lo largo de los cuatro capítulos, se mencionarán puntos importantes a considerar en dicha implementación, partiendo del análisis de operación termodinámica que finalmente se centrará en mantener un equilibrio de masa entre el agua de alimentación de la caldera y el vapor producido. Como punto central de dicho control, se busca mantener el nivel del domo en el punto de consigna, no importando los cambios de las demandas bajas o altas de vapor. Finalmente, se presentará un breve estudio económico y se resaltarán la importancia de conocer los valores de producción de vapor y recursos consumidos.



# OBJETIVOS

## General

Ejecutar la filosofía para el control automático de nivel del domo de una caldera acuotubular, mediante el uso de instrumentación, medición de flujo de vapor producido, flujo de agua de alimentación al domo y nivel del domo, evitando así oscilaciones bruscas en el nivel que produzcan arrastre de vapor.

## Específicos

1. Controlar los parámetros que influyen en el nivel del domo de la caldera para obtener el valor deseado.
2. Obtener la medición del vapor de salida para realizar análisis de costos del combustible y recursos utilizados durante el proceso.
3. Monitorear las variables que influyen en el proceso de producción de vapor.
4. Implementar un sistema de seguridad por disparo ante la ausencia de agua en el domo.



## INTRODUCCIÓN

Para la producción de vapor, la cual consiste en llevar al agua hasta su punto de ebullición, se utilizan diversos métodos de calentamiento. Uno de ellos es a través de intercambiadores de calor. La idea de la producción de vapor en la industria textil y cogeneración es obtener energía térmica para utilizarla en diversos procesos que requieran vapor con diferentes características. En el caso particular de una caldera, que es un intercambiador de calor, se busca llevar el agua contenida dentro del domo hasta su punto de ebullición y que exista un cambio de estado a través del calentamiento de la superficie que la contiene.

Con el pasar del tiempo, la principal preocupación de la producción de vapor por medio de calderas es el mejor aprovechamiento de los recursos utilizados durante todo el proceso, reducir costos de mano de obra, número de operarios, entre otros.

En la industria textil, el vapor de agua es utilizado en estado relativamente húmedo para los procesos que lo requieran como lavado, tinturado, blanqueado, agente decolorante y planchado, entre otros. Debido a que en la industria textil donde se realizará dicha aplicación el vapor también es utilizado para cogeneración a través de una turbina, es necesario conocer las características que debe tener el vapor para el adecuado funcionamiento de dicha turbina. Las diferencias del uso que se le dará al vapor producido en la caldera radican en los estados de humedad con que este se producirá. Para obtener las características del vapor a utilizar existen diversos factores que lo afectan, como: regulación, control y seguridad. Estos dependen

primordialmente de la demanda de vapor, por lo tanto, es necesario conocer los parámetros de operación normales de dicha caldera. Debido a que se implementará un control automático, se necesitan puntos de consigna (SP) normalmente accesibles al operador y otros que no pueden ser alterados.

Como la producción de vapor es un proceso costoso, en el presente estudio se encontrarán las ventajas que se obtienen al instrumentar una caldera, pues es necesario tener un control de los recursos consumidos no utilizados y los recursos generados. La medición continua del combustible utilizado y del vapor generado permiten tener un mejor control y realizar estudios o análisis para el mejor aprovechamiento de estos a través de la reducción de costos, también es necesario implementar un sistema de seguridad por medio de una cadena de disparo, cuya finalidad es proteger la caldera ante la ausencia de agua y evitar accidentes innecesarios durante la operación.



# 1. ANTECEDENTES

## 1.1. Vapor de agua

Es un gas que se forma cuando el agua cambia de su estado líquido al estado gaseoso. Desde un punto de vista molecular, cuando el agua está en su estado líquido, las moléculas que la conforman están siendo unidas y separadas constantemente. Sin embargo, cuando se suministra calor por cualquier medio, el agua absorbe el calor y las uniones que permiten que las moléculas estén unidas comienzan a romperse más rápido de lo que se pueden formar.

Mientras se suministra calor, el agua lo va absorbiendo y cuando se ha suministrado suficiente, algunas moléculas se romperán libremente sin ninguna oposición. Estos residuos de moléculas libres forman lo que se conoce como vapor de agua.

Por el contrario, si el vapor de agua es liberado en un ambiente de menor temperatura, este comienza a perder energía calorífica, por lo que las uniones moleculares se empiezan a formar nuevamente y se obtiene lo que se conoce como vapor húmedo (mezcla de agua y vapor de agua). Eventualmente, cuando existe una pérdida de energía calorífica total, se obtiene lo que se conoce como condensado. El vapor es a menudo clasificado por sus diferentes condiciones de temperatura y presión bajo las cuales dicho vapor existe.

El vapor es usado en un gran rango de industrias, las aplicaciones más comúnmente utilizadas son, por ejemplo, procesos calentados por vapor en fábricas, plantas y turbinas impulsadas por vapor en plantas eléctricas.

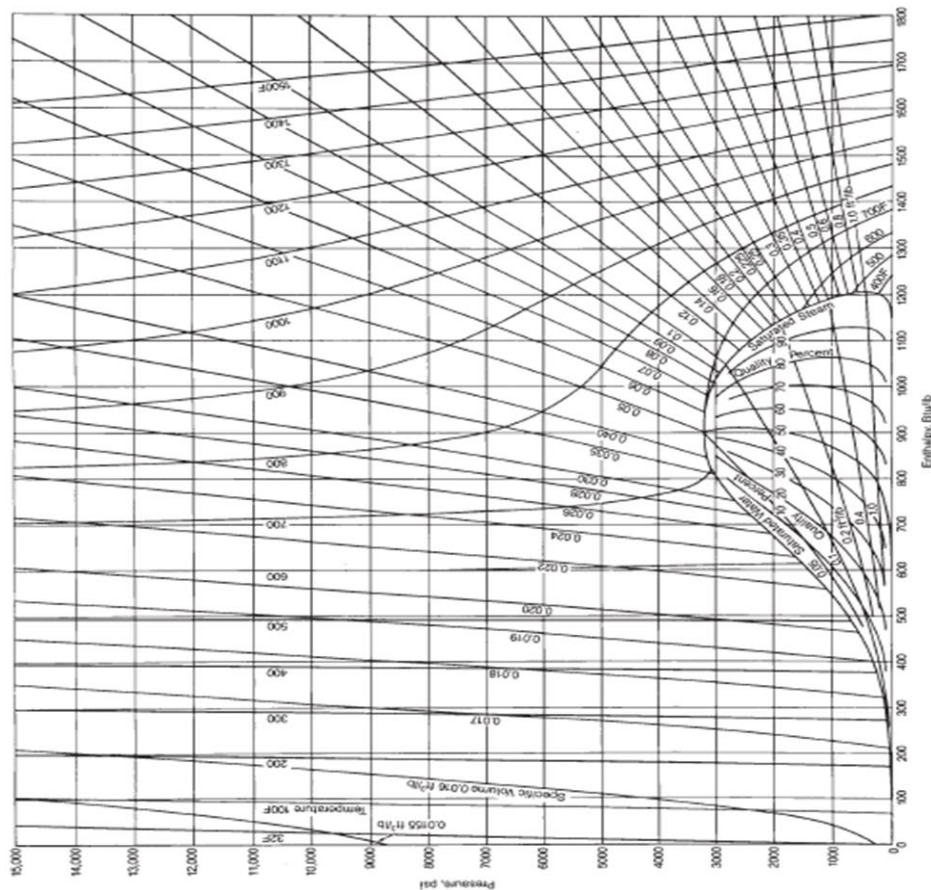
Entre las propiedades del vapor de agua están:

- Entalpía: es una medida general cuya variación representa la energía interna almacenada en un sistema que este puede intercambiar con su entorno, se representa con la letra  $H$ , puede ser calculada en Joules, kilocalorías o *british thermal unit* por libra masa.
- Entropía: es una magnitud física que determina la parte de la energía que no puede utilizarse para producir trabajo. Es una función de estado de carácter extensivo y su valor en un sistema aislado tiende a aumentar cuando este se da de manera natural, puede ser calculada en kiloJoule/kilogramo o *british thermal unit* /libra masa y comúnmente es representada por la letra  $S$ .
- Volumen específico: es el volumen ocupado por unidad de masa de un material dado, matemáticamente es el inverso de la densidad, por lo cual no dependen de la cantidad de materia, es independiente de la cantidad de materia que es considerada para calcularlo, puede ser calculado en metro cúbico/kilogramo o pies cúbicos/libra masa, es representado por la letra  $v$ .
- Energía interna: se refiere a la suma de todas las formas microscópicas de energía en un sistema y se representa mediante la letra  $U$  y se calcula en *british thermal unit* /libra masa.

- BTU (*british thermal unit*): representa la cantidad de energía que se requiere para elevar a un grado Fahrenheit la temperatura de una libra de agua en condiciones atmosféricas normales, 1 BTU = 1,055 kJ; 1 BTU/h = 0,293 W.

El diagrama presión – entalpía (figura 1) muestra los valores de entalpía y volumen específico de vapor y agua para un rango amplio de presión y temperatura.

Figura 1. Diagrama presión – entalpía



Fuente: KITTO, J.; STULTZ, Steven. *Steam its generation and use*. p. 2-6.

Figura 2. Propiedades de vapor saturado y líquido saturado

Table 2 Properties of Saturated Steam and Saturated Water (Pressure) <sup>1</sup>													
Press. psia	Temp F	Volume, ft <sup>3</sup> /lb			Enthalpy, <sup>2</sup> Btu/lb			Entropy, Btu/lb F			Internal Energy, Btu/lb		Press. psia
		Water <i>v<sub>f</sub></i>	Evap <i>v<sub>g</sub></i>	Steam <i>v<sub>g</sub></i>	Water <i>H<sub>f</sub></i>	Evap <i>H<sub>fg</sub></i>	Steam <i>H<sub>g</sub></i>	Water <i>s<sub>f</sub></i>	Evap <i>s<sub>fg</sub></i>	Steam <i>s<sub>g</sub></i>	Water <i>u<sub>f</sub></i>	Steam <i>u<sub>g</sub></i>	
0.0886	31.996	0.01602	3303.8	3303.8	-0.03	1075.2	1075.2	0	2.1869	2.1869	0	102.10	0.0886
0.1	35.005	0.01602	2945.0	2945.0	3.01	1073.5	1076.5	0.0061	2.1701	2.1762	3.01	102.20	0.1
0.15	45.429	0.01602	2004.3	2004.3	13.48	1067.6	1081.1	0.0271	2.1136	2.1407	13.48	102.54	0.15
0.2	53.132	0.01603	1525.9	1525.9	21.20	1063.2	1084.4	0.0422	2.0734	2.1156	21.20	102.80	0.2
0.3	64.452	0.01604	1039.4	1039.4	32.53	1056.8	1089.4	0.0641	2.0164	2.0805	32.53	103.17	0.3
0.4	72.834	0.01606	791.8	791.9	40.91	1052.1	1093.0	0.0799	1.9758	2.0557	40.91	103.44	0.4
0.5	79.549	0.01607	641.3	641.3	47.62	1048.3	1095.9	0.0925	1.9441	2.0366	47.62	103.66	0.5
0.6	85.180	0.01609	539.9	539.9	53.24	1045.1	1098.3	0.1028	1.9182	2.0210	53.24	103.84	0.6
0.7	90.05	0.01610	466.80	466.81	58.10	1042.3	1100.4	0.1117	1.8962	2.0079	58.10	104.00	0.7
0.8	94.34	0.01611	411.56	411.57	62.39	1039.9	1102.3	0.1195	1.8770	1.9965	62.39	104.14	0.8
0.9	98.20	0.01613	368.30	368.32	66.24	1037.7	1103.9	0.1264	1.8601	1.9865	66.23	104.26	0.9
1	101.69	0.01614	333.49	333.51	69.73	1035.7	1105.4	0.1326	1.8450	1.9776	69.73	104.37	1
2	126.03	0.01623	173.70	173.72	94.02	1021.7	1115.8	0.1750	1.7445	1.9195	94.01	105.15	2
3	141.42	0.01630	118.69	118.70	109.39	1012.8	1122.2	0.2009	1.6949	1.8858	109.38	105.63	3
4	152.91	0.01636	90.61	90.63	120.89	1006.1	1126.9	0.2198	1.6423	1.8621	120.87	105.94	4
5	162.18	0.01641	73.507	73.52	130.16	1000.6	1130.7	0.2349	1.6090	1.8438	130.15	106.27	5
6	170.00	0.01645	61.963	61.98	137.99	995.9	1133.9	0.2474	1.5816	1.8290	137.97	106.51	6
7	176.79	0.01649	53.632	53.65	144.79	991.8	1136.6	0.2581	1.5583	1.8164	144.77	106.71	7
8	182.81	0.01652	47.328	47.34	150.83	988.2	1139.0	0.2675	1.5381	1.8056	150.80	106.89	8
9	188.22	0.01656	42.367	42.40	156.27	984.9	1141.1	0.2760	1.5201	1.7961	156.24	107.05	9
10	193.16	0.01659	38.406	38.42	161.22	981.8	1143.1	0.2836	1.5040	1.7875	161.19	107.20	10
14.696	211.95	0.01671	26.787	26.80	180.13	970.1	1150.3	0.3121	1.4445	1.7566	180.09	107.74	14.696
15	212.99	0.01672	26.278	26.30	181.18	969.5	1150.7	0.3137	1.4413	1.7549	181.13	107.77	15
20	227.92	0.01683	20.075	20.09	196.25	959.9	1156.2	0.3358	1.3961	1.7319	196.18	108.18	20
30	250.30	0.01700	13.7312	13.748	218.9	945.2	1164.1	0.3682	1.3313	1.6995	218.8	108.78	30
40	267.22	0.01715	10.4832	10.500	236.2	933.7	1169.8	0.3921	1.2945	1.6766	236.0	109.21	40
50	280.99	0.01727	8.4998	8.517	250.2	924.0	1174.2	0.4113	1.2475	1.6588	250.1	109.54	50
60	292.69	0.01738	7.1588	7.176	262.2	915.6	1177.8	0.4273	1.2169	1.6443	262.0	109.81	60
70	302.92	0.01748	6.1896	6.207	272.8	908.0	1180.8	0.4412	1.1907	1.6319	272.5	110.04	70
80	312.03	0.01757	5.4554	5.473	282.2	901.2	1183.3	0.4534	1.1678	1.6212	281.9	110.23	80
90	320.27	0.01766	4.8792	4.897	290.7	894.8	1185.6	0.4644	1.1473	1.6117	290.4	110.40	90
100	327.82	0.01774	4.4146	4.432	298.6	889.9	1187.5	0.4744	1.1288	1.6032	298.2	110.55	100
120	341.26	0.01789	3.7107	3.729	312.6	878.1	1190.7	0.4920	1.0964	1.5883	312.2	110.80	120
140	353.04	0.01802	3.2019	3.220	325.0	868.4	1193.4	0.5072	1.0685	1.5757	324.5	111.00	140
160	363.55	0.01815	2.8163	2.834	336.1	859.4	1195.5	0.5207	1.0440	1.5647	335.6	111.16	160
180	373.08	0.01827	2.5137	2.532	346.2	851.1	1197.3	0.5328	1.0220	1.5549	345.6	111.30	180
200	381.81	0.01839	2.2696	2.288	355.5	843.3	1198.8	0.5439	1.0021	1.5460	354.9	111.41	200
250	400.98	0.01865	1.8252	1.8439	376.2	825.4	1201.6	0.5679	0.9591	1.5270	375.3	111.63	250
300	417.37	0.01890	1.5245	1.5434	394.0	809.4	1203.4	0.5883	0.9229	1.5111	393.0	111.77	300
350	431.75	0.01913	1.3071	1.3262	409.8	794.6	1204.5	0.6060	0.8914	1.4974	408.6	111.86	350
400	444.63	0.0193	1.14225	1.1616	424.2	780.9	1205.0	0.6217	0.8635	1.4853	422.7	111.91	400
450	456.32	0.0196	1.01293	1.0324	437.3	767.9	1205.2	0.6360	0.8383	1.4743	435.7	111.92	450
500	467.05	0.0198	0.90840	0.9282	449.5	755.5	1205.0	0.6490	0.8152	1.4643	447.7	111.91	500
550	476.98	0.0199	0.82229	0.8422	460.9	743.6	1204.6	0.6611	0.7939	1.4550	458.9	111.88	550
600	485.25	0.0201	0.75002	0.7702	471.7	732.2	1203.9	0.6723	0.7740	1.4464	469.5	111.84	600
700	503.14	0.0205	0.63535	0.6559	491.6	710.3	1201.9	0.6928	0.7377	1.4305	489.0	111.70	700
800	518.27	0.0209	0.54830	0.5692	509.8	689.5	1199.3	0.7112	0.7050	1.4162	506.7	111.50	800
900	532.02	0.0212	0.47983	0.5011	526.7	669.4	1196.2	0.7279	0.6751	1.4030	523.2	111.27	900
1000	544.65	0.0216	0.42446	0.4461	542.6	650.0	1192.6	0.7434	0.6472	1.3906	538.6	111.00	1000
1100	556.35	0.0220	0.37869	0.4006	557.6	631.0	1188.6	0.7578	0.6211	1.3789	553.1	110.70	1100
1200	567.26	0.0223	0.34014	0.3625	571.8	612.4	1184.2	0.7714	0.5963	1.3677	568.9	110.37	1200
1300	577.50	0.0227	0.30718	0.3299	585.5	593.9	1179.5	0.7843	0.5727	1.3570	580.1	110.01	1300
1400	587.14	0.0231	0.27861	0.3017	598.8	575.7	1174.4	0.7966	0.5499	1.3465	592.8	109.63	1400
1500	596.27	0.0235	0.25357	0.2770	611.6	557.4	1169.0	0.8084	0.5279	1.3363	605.1	109.21	1500
2000	635.85	0.0256	0.16255	0.1882	671.8	464.7	1136.5	0.8622	0.4242	1.2864	662.3	106.69	2000
2500	668.17	0.0286	0.10208	0.1307	730.8	360.7	1091.5	0.9130	0.3199	1.2329	717.6	103.11	2500
3000	695.41	0.0344	0.05015	0.0845	802.9	213.6	1016.5	0.9736	0.1849	1.1585	783.8	96.95	3000
3200.11	705.1028	0.0497	0	0.0498	897.5	0	897.5	1.0538	0	1.0538	868.0	86.80	3200.11

Fuente: KITTO, J.; STULTZ, Steven. *Steam its generation and use*. p. 2-3.

## **1.2. Producción de vapor por medio de intercambiadores de calor**

Los intercambiadores de calor son dispositivos de ingeniería utilizados para la transferencia de calor (energía calorífica) entre dos medios, para la aplicación de generación de vapor se habla específicamente de intercambiadores de calor por conducción y convección.

Un generador de vapor conocido comúnmente en el ámbito de ingeniería a nivel industrial se le denomina caldera, que son recipientes cerrados en los cuales se calienta agua hasta generar vapor húmedo o vapor sobrecalentado, mediante la aplicación de calor generado por efecto de la combustión.

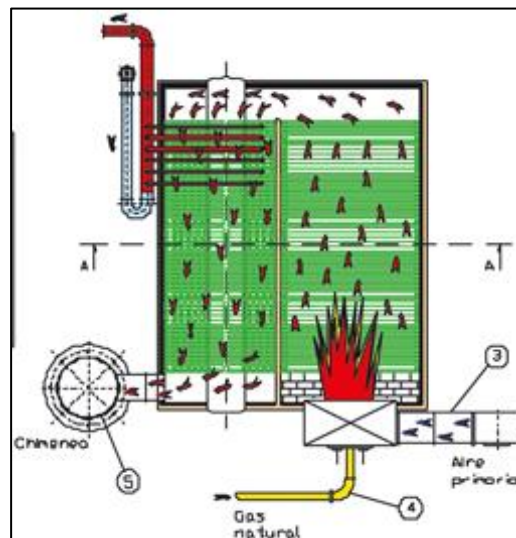
Una caldera es un intercambiador de calor que tiene como función generar vapor en sus diferentes estados, todo esto ocurre en el domo superior, para el caso de una caldera acuotubular, cuando se da una transferencia, de calor por conducción. Para llevar a cabo dicha transferencia el domo debe poseer características como, buena conductividad térmica, superficie de transferencia libre de impurezas, conexiones a proceso normadas y certificadas, entre otros.

Un generador de vapor, conocido como caldera, es representado por un recipiente presurizado en donde el calor procedente de cualquier fuente de energía provoca un cambio de fase en el fluido líquido contenido en el recipiente.

El fluido se transforma en un medio de transporte de energía, en este caso vapor de agua, la caldera es un caso particular en el que se eleva a altas temperaturas un segmento de intercambiadores de calor en la cual se produce un cambio de fase. Debido a las altas presiones y temperaturas que se producen dentro de la caldera, es necesario construirla en parte con acero,

semejante a muchos contenedores de gas. El recorrido de los gases de escape para el calentamiento de agua de alimentación o aire para la combustión se representa en la figura 3.

Figura 3. **Recorrido de los gases de escape**



Fuente: *Producción de calor por medio de intercambiadores de calor.*

[http://www.scielo.org.ar/scielo.php?pid=S185130182008000200003&script=sci\\_arttext#fig2](http://www.scielo.org.ar/scielo.php?pid=S185130182008000200003&script=sci_arttext#fig2).

Consulta: junio de 2015.

La producción de vapor por medio de calderas puede ser en dos tipos de calderas:

- Calderas pirotubulares: es la caldera donde el agua envuelve a los tubos que contienen los gases producto de la combustión.

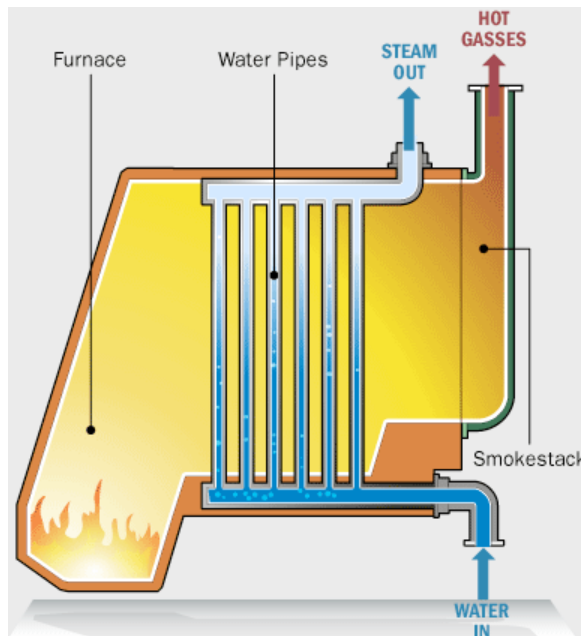
- Calderas acuotubulares: en este tipo de caldera el agua va contenida dentro de los tubos y es envuelta por los gases producto de la combustión.

Para desarrollar dicha aplicación se utilizará una caldera de tipo acuotubular.

- Caldera acuotubular: un intercambiador de vapor de este tipo consta primordialmente de dos partes:
  - Zona de liberación de calor o cámara de combustión (*furnace*): es el lugar donde se quema el combustible.
  - Zona de tubos (*water pipes*): es la zona donde los productos de la combustión (gases de escape) transfieren calor al agua principalmente por convección (gases-aguas). Esta zona está constituida por tubos, dentro de los cuales pueden circular gases o agua de calentamiento, dicha disposición se representa a continuación.



Figura 4. Disposición de tubería de alojamiento de agua



Fuente: *Producción de calor por medio de intercambiadores de calor.*

<http://www.petervaldivia.com/technology/mechanisms/image/steam-boiler.gif>. Consulta: junio de 2015.

En el caso de una caldera acuotubular, para obtener un calor de suministro adecuado para el proceso, es necesario partir del hecho de que la transferencia de calor también dependerá de la combustión creada en el hogar. Para dicha combustión es necesario obtener tres elementos fundamentales:

- Combustible con un adecuado poder calorífico
- Suministro correcto de aire
- Fuente de calor

En un control automático de dosificación de combustible es necesario manejar una relación de aire y combustible, la cual es propia de cada caldera y

parte de una característica primordial, que es la presión de operación del domo.

Mientras se obtenga una combustión adecuada en el hogar, es necesario verificar y crear ciclos de limpieza, pues en ocasiones impurezas como combustible no quemado, cenizas, entre otros, se van adhiriendo a la superficie de intercambio tales como los tubos de conexión entre domo superior e inferior, súper calentador y la superficie del domo.

Estas impurezas crean una capa de resistencia a la transferencia de calor, con lo cual aumenta la resistividad térmica de todas las superficies de intercambio de calor. El efecto en dicho escenario tiene como consecuencia el aumento de consumo de combustible para obtener las condiciones de operación y la producción de vapor de baja calidad.

### **1.3. Control del proceso de generación de vapor**

El control para el proceso de la producción de vapor es de origen multidisciplinario en ingeniería (mecánica, electricidad, electrónica, neumática e hidráulica), su finalidad es controlar el funcionamiento de la caldera. En este proceso, por lo general, se tiene una serie de entradas y salidas que provienen del sistema a controlar, llamado planta o campo. Se diseña un sistema para que, a partir de estas entradas y salidas, modifique ciertos parámetros en el sistema planta, con lo que se obtendrán los valores deseados de proceso.

En los inicios, las calderas eran operadas de manera manual, pues existen elementos de medición y de regulación que permiten hacerlo de esta forma. Bajo estas condiciones, la caldera funciona de manera correcta, sin embargo, se obtienen eficiencias relativamente bajas. Con el desarrollo de nuevas

tecnologías que se basan en principios físicos y químicos de medición, se encuentran con diversas soluciones para el control de procesos de calderas a través de la instrumentación y el control automático.

Para desarrollar el control del proceso en la generación de vapor controlando el nivel se utilizarán 3 mediciones principales:

- Medición del flujo de agua de alimentación al domo de la caldera
- Medición del nivel de agua del domo
- Medición de flujo de vapor a la salida del domo de la caldera

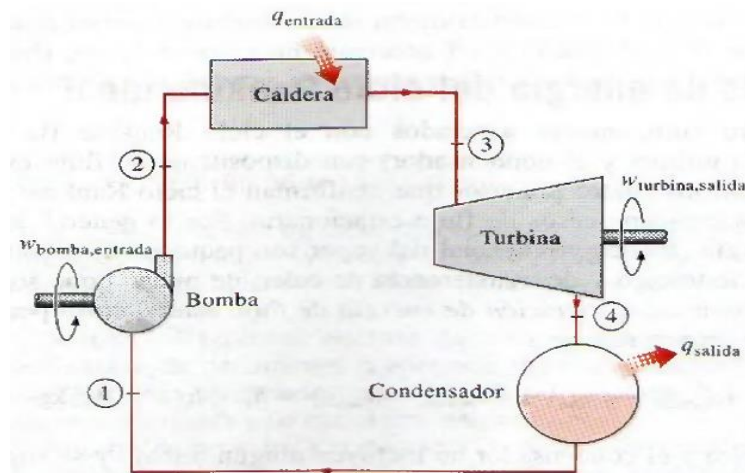
En la teoría de control y en instrumentación industrial se conoce como lazo de control, o control *loop*, a un conjunto de componentes que constan de: elemento sensor, transductor de señal, receptor de señal, comparador de punto de ajuste, mecanismo de control y elemento final de control (válvula, calentador, interruptor, entre otros).

Para controlar el nivel del domo se utilizarán tres variables de entrada y un elemento final de control, estos se encuentran configurados en forma de circuito, de tal manera que la señal de control es transmitida al elemento final de control para ajustar el proceso a un punto de consigna, dependiendo de la magnitud del estímulo generado por el proceso.

Parte del sistema de control es buscar la protección de los equipos y maquinaria que puedan verse afectados por causa del exceso o la falta de agua en el sistema de transferencia de calor. Dicha seguridad no será controlada por el sistema de control, solamente monitoreada para crear permisos de funcionamiento.

El control del proceso se realizará tomando como referencia el ciclo de Rankine ideal simple:

Figura 5. **Ciclo de Rankine simple**



Funete: YUNUS, Cengel; BOLES, Michaels. *Termodinámica*. p. 563.

La regulación del flujo del agua de alimentación que establece el nivel de la caldera depende de diversos factores, tales como:

- Tipo de caldera
- Carga
- Tipo de bomba
- Presión del agua de alimentación

El sistema de control del agua de alimentación puede realizarse de acuerdo con la capacidad de producción de la caldera, para desarrollar correctamente el control del proceso en la generación de vapor se utilizará el criterio de tres elementos.

A la caldera se le exige mantener una presión de trabajo constante, para los diversos caudales de vapor consumidos en el proceso, los cuales deben satisfacer en cualquier régimen de utilización, primordialmente:

- Aportar una energía calorífica suficiente en la combustión del *fuel-oil* o del gas con el aire.
- Desde el punto de vista de seguridad, el nivel debe estar controlado mantenido dentro de sus límites.
- Es necesario garantizar una llama segura en la combustión.
- El sistema de control debe ser seguro en la puesta en marcha, en la operación y en el paro de la caldera.
- El funcionamiento de la caldera debe ser optimizado para lograr una rentabilidad y economía adecuadas, lo cual es posible con un control digital o distribuido que permite optimizar la combustión (ahorros de 2 a 10 % en combustible) y ganancia en seguridad.

La regulación de la combustión se basa en mantener constante la presión de vapor en la caldera, tomándose sus variaciones como una medida de la diferencia entre el calor tomado de la caldera como vapor y el calor suministrado.

La regulación del agua de alimentación que establece el nivel de la caldera depende de múltiples factores: tipo de caldera, carga, tipo de bomba y control de presión del agua de alimentación.

El control automático en la producción de vapor facilita las tareas que en un principio se hacían manualmente, actualmente es posible el control de la mayor parte de variables que surgen en el campo de la generación de vapor.

## **2. CONCEPTOS BÁSICOS DE LAS CALDERAS ACUOTUBULARES**

### **2.1. Principio de funcionamiento de calderas acuotubulares**

A continuación se describen los principios de funcionamiento de las calderas acuotubulares.

#### **2.1.1. Alimentación de agua**

El agua de alimentación es aquella que entra al sistema, generalmente agua de pozo o agua de red con algún tratamiento químico. El agua de alimentación de calderas desempeña un papel importante para el correcto funcionamiento de los generadores de vapor. Puesto que este tipo de dispositivos está en uso la mayor cantidad de tiempo disponible, un correcto tratamiento del agua de alimentación permite evitar o reducir las averías y tiempos de parada.

El agua de alimentación de caldera busca eliminar la sal y los gases que contienen mediante un proceso térmico. El agua se evapora completamente, obteniendo como resultado una elevada concentración de sustancias en el agua de la caldera, esta operación concentra las sustancias de la caldera de vapor y hace que se formen depósitos. Controlando y limitando el aumento en la concentración de sal del agua de la caldera y dosificando las sustancias químicas del agua de alimentación, pueden evitarse efectos negativos.

El objetivo principal del tratamiento de agua es evitar problemas de corrosión e incrustaciones, asegurando la calidad del agua de alimentación y del agua contenida en la caldera. El aseguramiento de la calidad del agua de alimentación y agua de la caldera se consigue cumpliendo con los requerimientos de las normas, que definen los límites recomendados para los parámetros involucrados en el tratamiento del agua.

Los principales parámetros involucrados en el tratamiento del agua de una caldera, son los siguientes:

- pH: representa las características ácidas o alcalinas del agua, por lo que su control es esencial para prevenir problemas de corrosión (bajo pH) y depósitos (alto pH).
- Dureza: cuantifica principalmente la cantidad de iones de calcio y magnesio presentes en el agua, los que favorecen la formación de depósitos e incrustaciones difíciles de remover sobre las superficies de transferencia de calor de una caldera.
- Oxígeno: favorece la corrosión de los componentes metálicos de una caldera. La presión y temperatura aumentan la velocidad con que se produce la corrosión.
- Hierro y cobre: forman depósitos que deterioran la transferencia de calor. Se pueden utilizar filtros para remover estas sustancias.
- Dióxido de carbono: al igual que el oxígeno favorece la corrosión. Este tipo de corrosión se manifiesta en forma de ranuras y no de tubérculos como los resultantes de la corrosión por oxígeno. La corrosión en las

líneas de retorno de condensado generalmente es causada por el dióxido de carbono. El dióxido de carbono se disuelve en agua (condensado), produciendo ácido carbónico. La corrosión causada por el ácido carbónico ocurrirá bajo el nivel del agua y puede ser identificada por las ranuras o canales que se forman en el metal.

- Fosfato: se utiliza para controlar el pH y dar protección contra la dureza.
- Sólidos disueltos: son la cantidad de sólidos (impurezas) disueltos en el agua.
- Sólidos en suspensión: representan la cantidad de sólidos (impurezas) presentes en suspensión (no disueltos) en el agua.
- Removedores de oxígeno: corresponden a productos químicos (sulfitos, hidrazina, hidroquinona, entre otros) utilizados para remover el oxígeno residual del agua.
- Sílice: puede formar incrustaciones duras (silicatos) o de muy baja conductividad térmica (silicatos de calcio y magnesio).
- Alcalinidad: representa la cantidad de carbonatos, bicarbonatos, hidróxidos y silicatos o fosfatos en el agua. La alcalinidad del agua de alimentación es importante, ya que representa una fuente potencial de depósitos.
- Conductividad: permite controlar la cantidad de sales (iones) disueltas en el agua.



Los parámetros anteriormente descritos deben ser controlados y buscar llegarlos a los valores deseados, pues el control automático logrará tener un desempeño bastante alto, siempre que no existan consecuencias manifestadas en los componentes del sistema. Para la obtención de estos valores, se pueden obtener parámetros tomando como referencia la siguiente tabla.

Tabla I. **Límites recomendados de agua de alimentación basados en presiones de operación**

Pressure, psig (MPa)	Table 1 Recommended Feedwater Limits							Once-Through Boilers		
	Drum Boilers							with AVT*	AVT	Oxygen Treatment
	15 to 300 (0.10 to 2.07)	301 to 600 (2.08 to 4.14)	601 to 900 (4.14 to 6.21)	901 to 1000 (6.21 to 6.90)	1001 to 1500 (6.90 to 10.34)	>1500 (>10.34)	All			
pH, all ferrous heaters	9.3 to 10.0	9.3 to 10.0	9.3 to 10.0	9.3 to 9.6	9.3 to 9.6	9.3 to 9.6	9.3 to 9.6	9.3 to 9.6	8.0 to 8.5	
pH, copper- bearing heaters	8.8 to 9.2	8.8 to 9.2	8.8 to 9.2	8.8 to 9.2	8.8 to 9.2	8.8 to 9.2	8.8 to 9.2**	8.8 to 9.2	N/A	
Total hardness, as ppm CaCO <sub>3</sub> , maximum	0.3	0.2	0.1	0.05	0.003	0.003	0.003	0.003	0.001	
Oxygen, ppm maximum***	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.030 to 0.150	
Iron, ppm maximum	0.1	0.04	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.010	0.005	
Copper, ppm maximum	0.05	0.02	0.01	0.01	0.005	0.002	0.005	0.002	0.001	
Organic, ppm TOC max.	1.0	1.0	0.5	0.2	0.2	0.2	0.2	0.200	0.200	
Cation conductivity, µS/cm max.	—	—	—	—	0.5	0.2	0.2	0.15	0.15	

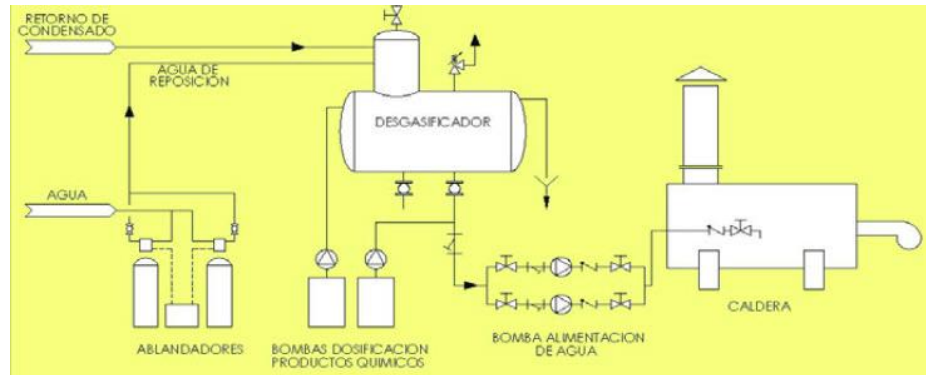
\* All volatile treatment.  
 \*\* AVT not recommended for copper-bearing cycles and associated low feedwater pH where the drum pressure is less than 400 psig.  
 \*\*\* By mechanical deaeration before chemical scavenging of residual.

Note:  
 ppm = mg/kg

Fuente: KITTO, J; STULTZ, Steven. *Steam its generation and use*. p. 42.

El recorrido de agua de alimentación de la caldera difiere, en cuanto a su ciclo de operación y al tipo de caldera. Para fines de explicación de un ciclo termodinámico de una caldera acuotubular, el ciclo de operación para el calentamiento y posterior cambio de fase de agua a vapor se representa a continuación.

Figura 6. **Recorrido de agua de alimentación para caldera**



Fuente: *Recorrido de agua de alimentación para caldera.*

[.http://cagnazucar.blogspot.com/2015/05/equipo-para-tratamiento-de-agua-de.html](http://cagnazucar.blogspot.com/2015/05/equipo-para-tratamiento-de-agua-de.html). Consulta: junio de 2015.

### 2.1.2. **Transferencia de calor**

Los intercambiadores de calor son dispositivos utilizados para la transferencia de calor (energía calorífica) entre dos medios. Para la aplicación de generación de vapor se habla específicamente de intercambiadores de calor por conducción y convección.

- **Transferencia de calor por conducción:** la conducción es la transferencia de calor, por medio de la excitación molecular en el interior del material, sin ningún tipo de movimiento entre los objetos. Si un extremo de una barra de metal está a una temperatura más alta, entonces se transferirá energía hacia el extremo más frío, tal como se muestra en la figura 7. Debido a las colisiones de partículas de alta velocidad con las más lentas, se produce una transferencia neta de energía hacia estas últimas. Esta transferencia se da por una fuente de calor y se propaga por medio del mismo cuerpo

Figura 7. **Transferencia de calor por conducción**



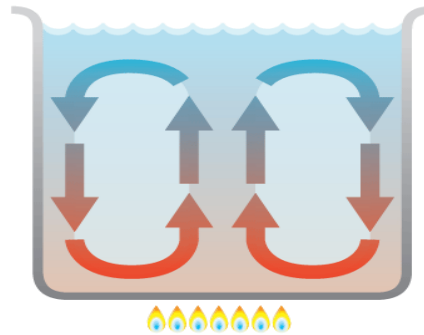
Fuente: *Transferencia de calor por conducción.*

<http://didactalia.net/comunidad/materiaeducativo/recurso/el-calor-energia-en-transito>.

Consulta: junio de 2015

Transferencia de calor por convección: la convección es una de las tres formas de transferencia de calor y se caracteriza porque se produce por medio de un fluido (líquido o gas) que transporta el calor entre zonas con diferentes temperaturas. La convección se produce únicamente por medio de materiales, la evaporación del agua o fluidos. Lo que se llama convección en sí, es el transporte de calor por medio del movimiento del fluido, por ejemplo: al trasegar el fluido por medio de bombas o al calentar agua en una cacerola; el agua que está en contacto con la parte de abajo de la cacerola se mueve hacia arriba, mientras que el agua que está en la superficie, desciende, ocupando el lugar que dejó la caliente, tal como se muestra en la figura 8.

Figura 8. **Transferencia de calor por convección**



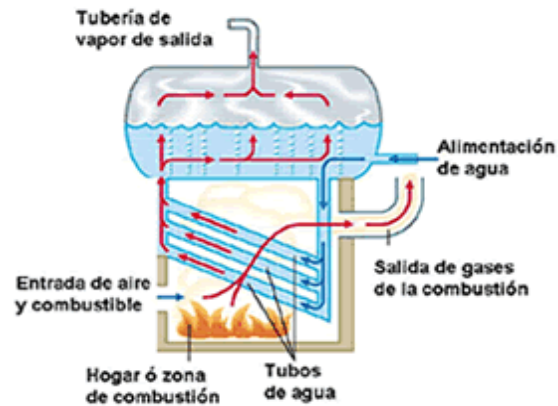
Fuente: *Transferencia de calor por convección*.

<http://cbtis37fisica2.blogspot.es/1409874665/transferencia-de-calor/>. Consulta: junio de 2015.

La transferencia de calor básicamente inicia con la combustión en el hogar de la caldera, transfiriendo calor en la zona de tubos de agua y finalmente abandona la caldera a través de la chimenea. En algunas calderas, antes de que los gases de escape abandonen la caldera transfieren calor a calentadores de aire o al economizador, que es un calentador de agua de alimentación.

Los gases de escape abandonan la caldera por circulación natural debido a la diferencia de densidades con respecto del aire del medio ambiente. En algunas otras calderas es necesario un ventilador de tiro inducido, el cual succiona los gases y los expulsa al medio ambiente. La transferencia de calor en la zona de tubos sigue la trayectoria representada en la figura 9.

Figura 9. **Transferencia de calor hacia la zona de tubos**



Fuente: *Transferencia de calor hacia la zona de tubos.*

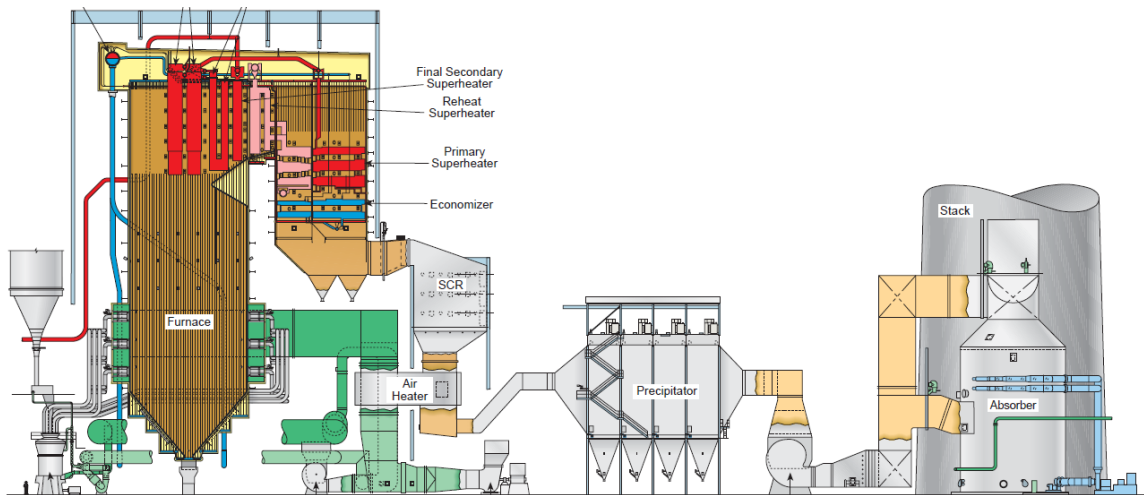
[http://www.inpsasel.gob.ve/moo\\_news/Prensa\\_299.html](http://www.inpsasel.gob.ve/moo_news/Prensa_299.html). Consulta: junio de 2015.

Los gases de escape deberán salir al medio ambiente lo más limpios posible, para esto es necesario hacer que circulen a través de equipos de limpieza como:

- Precipitador electrostático
- Selector reductor catalítico (SCR)
- Depuradores o absorbedores

Estos equipos son representados en la figura 10.

Figura 10. **Ciclo completo de una caldera acuotubular**



Fuente: KITTO, J.; STULTZ, Steven. *Steam its generation and use*. p. 50.

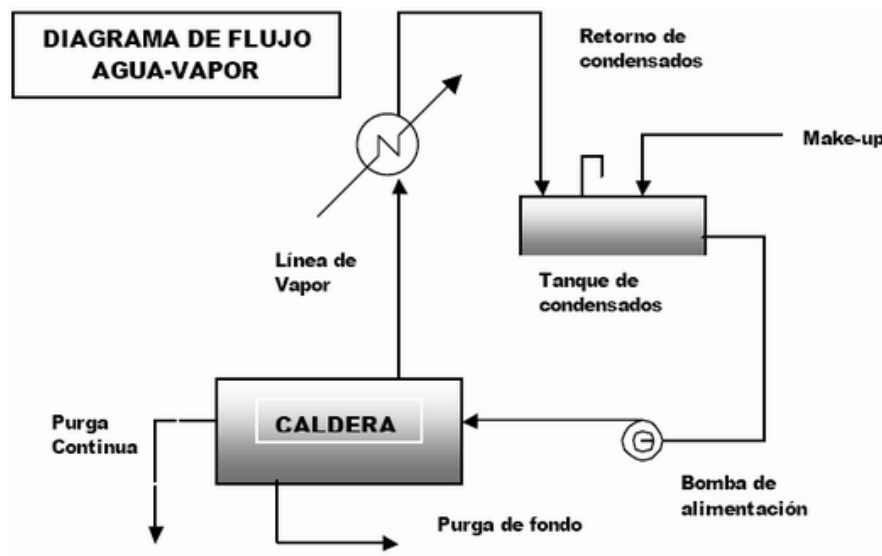
### 2.1.3. **Proceso de vapor**

La generación industrial de vapor es el proceso mediante el cual se produce vapor a presiones por encima de la atmosférica, partiendo de energía de un combustible o de energía eléctrica. El vapor producido será posteriormente utilizado en diferentes funciones de la fábrica, como aportación de calor en procesos o movimiento de máquinas.

El agua calentada o vapor se levanta de la superficie, se vaporiza y es recolectada en uno o varios colectores, el tamaño del colector determina la capacidad de producción de vapor. En la parte superior del colector se encuentra la salida, o el llamado cabezal de vapor, donde el vapor es conducido desde el colector hasta los puntos de uso, utilizando como medio de transporte tubería con aislamiento térmico.

En la parte superior del hogar se encuentra una chimenea de metal o de ladrillo, la cual conduce hacia fuera los productos de la combustión (gases de escape). En el fondo de la caldera se encuentra una válvula de salida llamada purga de fondo, por esta válvula salen del sistema la mayoría de lodos y otras sustancias no deseadas.

Figura 11. **Proceso de producción de vapor**



Fuente: *Proceso de producción de vapor*. <http://www.monografias.com/trabajos42/generacion-de-vapor/generacion-de-vapor2.shtml>. Consulta: junio de 2015.

## 2.2. **Uso de calderas acuotubulares**

A continuación se hace una descripción del uso de las calderas acuotubulares.

### **2.2.1. Cogeneración**

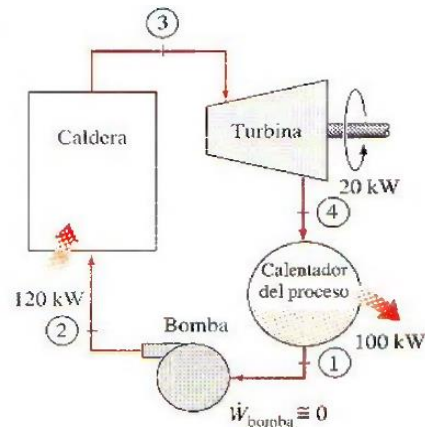
La industria utiliza grandes cantidades de calor para sus procesos que, a su vez consumen una gran cantidad de energía eléctrica. Por tal razón, es necesario economizar utilizando el potencial de trabajo ya existente para producir energía, en lugar de permitir que se desperdicie. La planta resultante de esta aplicación es una planta de cogeneración de electricidad a través del vapor generado en la caldera, toda vez se cubran los requerimientos de calor en los otros procesos que lo necesitan.

En general, la cogeneración es la producción de más de una forma útil de energía (como calor de proceso y energía eléctrica) a partir de la misma fuente de energía, en otras palabras, toda la energía transferida al vapor en la caldera se emplea ya sea como calor de proceso o como energía eléctrica.

La ventaja de la cogeneración, es su mayor eficiencia energética ya que se aprovecha tanto el calor, como la energía mecánica o eléctrica de un único proceso; en lugar de utilizar una central eléctrica convencional y, para las necesidades de calor, una caldera convencional. El ciclo utilizado para cogeneración es el ciclo de Rankine.



Figura 12. **Ciclo básico de Rankine para cogeneración**



Fuente: CENGEL, Yunus; BOLES, Michaels. *Termodinámica*. p. 589.

### 2.2.2. Calentamiento

Algunos sistemas o dispositivos requieren la entrada de energía en forma de calor, algunas veces llamado calor de proceso. Algunas industrias que utilizan diversos procesos de calor son la industria química, papel y pulpa, producción y refinación de petróleo, fabricación de acero, procesamiento de alimentos y la industria textil.

El calor para dichos procesos se suministra en valores de presión que oscilan entre 73,5 a 102,9 PSI, y temperaturas que oscilan entre 150 a 200 °C, descartando cualquier pérdida térmica en la tubería, se considera que todo el calor transferido hacia el vapor en la caldera se usa en las unidades de calentamiento de proceso. Esto se asemeja a una operación casi perfecta, es decir, casi sin desperdicio de energía, sin embargo, desde el punto de vista de la segunda ley de la termodinámica, no funciona así.

La industria textil utiliza grandes cantidades de calor para sus procesos, entre ellos están:

- Tinturado: procesos de inmersión en tintes a temperaturas de ebullición.
- Planchado: proceso previo al empaquetado para despacho.
- Lavado: proceso en el cual se limpian las telas que así lo requieran.
- Blanqueado: proceso en el cual se busca llevar las telas a un color neutro (lo más cercano al blanco), a través de la destilación en agua caliente.
- Estampado: proceso mediante el cual se imprime la etiqueta del fabricante, esto es por medio de una marca hermética que se adhiere a la tela al contacto.
- Servicios: se utiliza para calentar agua en los baños que prestan servicio a los empleados para ducha.

El flujo de vapor puede ajustarse de manera que este se extraiga del proceso como líquido saturado a alta temperatura, en otras palabras, toda la energía transferida al vapor en la caldera se emplea ya sea como energía eléctrica o como calor de proceso, tal como lo requieren los procesos en la industria textil.

Entre los aprovechamientos del calor de vapor, también está la posibilidad de calentar el agua de alimentación, con lo cual se obtiene una mejor eficiencia. Esto se puede realizar extrayendo calor al vapor de agua por medio de cámaras de mezclado directo e indirecto. Actualmente no se cuenta con mediciones de consumo en dichos puntos, por lo que solamente se estima el consumo en función de la presión y temperatura que el proceso requiera, en algunas unidades de proceso se estima el consumo partiendo de los datos de placa de dichas unidades.

## **2.3. Ciclos termodinámicos de una caldera acuotubular**

Los ciclos termodinámicos de una caldera acuotubular se integran por el ciclo de Rankine simple, Rankine con sobrecalentamiento, Rankine recalentado y Rankine recuperativo, los cuales se describen a continuación.

### **2.3.1. Rankine simple**

El ciclo de Rankine es un ciclo termodinámico que tiene como objetivo la conversión de calor en trabajo, constituyendo lo que se denomina como un ciclo de potencia. Como cualquier otro ciclo de potencia, su eficiencia está acotada por la eficiencia termodinámica de un ciclo de Carnot que opera entre los mismos focos térmicos (límite máximo que impone el segundo principio de la termodinámica).

En un ciclo termodinámico, que consta de la producción de vapor sobrecalentado que llega a ser condensado, es posible, en algunos puntos, eliminar aspectos que no son de aprovechamiento para el ciclo. La resultante de eliminar estos aspectos es lo que se conoce como el ciclo de Rankine, el cual describe un ciclo ideal para centrales dedicadas a la producción de vapor en diversos usos.

El ciclo de Rankine ideal no incluye ninguna irreversibilidad interna y está compuesto por los siguientes elementos.

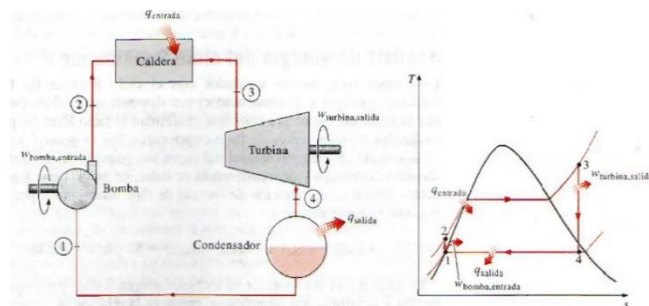
- Compresión isentrópica de una bomba: el fluido de trabajo en fase líquida, mediante una bomba, lo cual implica un consumo de potencia, aumenta la presión del fluido de trabajo hasta el valor de presión en caldera. Esta condición de funcionamiento implica que la presión a la

cual se suministra agua hacia la caldera debe ser mayor que la presión dentro del domo.

- Adición de calor a presión constante en la caldera: el fluido de trabajo se calienta hasta la temperatura de saturación, luego tiene lugar el cambio de fase líquido-vapor y finalmente se obtiene vapor sobrecalentado. Este vapor sobrecalentado a alta presión es el utilizado por la turbina para generar la potencia del ciclo.
- Expansión isentropía en una turbina: se realiza en una turbina de vapor y se genera potencia en el eje de la misma, aquí la entropía del fluido permanece constante.
- Rechazo de calor a presión constante en un condensador: de forma que el fluido de trabajo alcanza el estado de líquido saturado. Se realiza en un condensador (intercambiador de calor), idealmente sin pérdidas de carga.

La representación gráfico del ciclo se presenta en la figura 13.

Figura 13. **Ciclo básico de Rankine**



Fuente: CENGEL, Yunus; BOLES, Michaels. *Termodinámica*. p. 563.

El agua entra a la bomba en el estado 1 como líquido saturado y se condensa isentrópicamente hasta la presión de operación de la caldera o mayor que la del domo. La temperatura del agua aumenta un poco durante este proceso de compresión isentrópica, debido a una ligera disminución en el volumen específico del agua.

La distancia vertical entre los estados 1 y 2 en el diagrama temperatura – entropía se representa de una manera aumentada, con la finalidad de una mejor apreciación de lo que ocurre en el proceso. Durante este proceso se observa que si el agua fuera realmente incompresible no existiría un leve aumento de temperatura durante este proceso.

El agua entra a la caldera como líquido comprimido en el estado 2 y sale como vapor sobrecalentado en el estado 3.

Para este ciclo de Rankine, el vapor sobrecalentado en el estado 3 entra a la turbina donde se expande isentrópicamente y produce un trabajo mecánico al hacer girar el eje que esta acoplado al generador eléctrico.

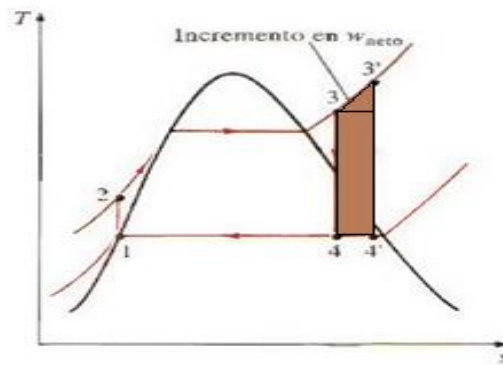
El vapor se condensa a presión constante dentro del condensador, el cual básicamente es otro intercambiador de calor en la planta generadora de vapor. El calor es rechazado hacia un medio de enfriamiento, al salir del condensador se encuentra en un estado de líquido saturado, listo para entrar de nuevo a la caldera a través de la bomba, completando así el ciclo.

### **2.3.2. Rankine con sobrecalentamiento**

La temperatura del vapor producido en una primera etapa de la caldera puede ser incrementada sin aumentar la presión de la caldera, gracias al

sobrecalentamiento del vapor a altas temperaturas. El efecto del sobrecalentamiento en el desempeño de los ciclos de potencia de vapor se ilustra en un diagrama, representado en la figura 14.

Figura 14. **Ciclo de Rankine con sobrecalentamiento**



Fuente: *Ciclo de Rankine con sobrecalentamiento*. <http://sounak4u.weebly.com/vapour-combined-power-cycle.html>. Consulta: junio de 2015.

El área sombreada en este diagrama representa el aumento en el trabajo neto, mientras que el área total bajo la curva del proceso 3-3' representa el aumento en la entrada de calor. De este modo, tanto el trabajo neto como la entrada de calor aumentan como resultado del sobrecalentamiento del vapor a una temperatura más alta. Sin embargo, el efecto total es un incremento en la eficiencia térmica, porque aumenta la temperatura promedio a la cual se añade calor.

El sobrecalentamiento del vapor a temperaturas más altas tiene otro efecto muy conveniente: disminuye el contenido de humedad del vapor a la salida de la turbina, como se observa en el diagrama T-s (la calidad del estado 4' es más alta que la del estado 4).

Sin embargo, la temperatura a la que el vapor se sobrecalienta está limitada debido a consideraciones metalúrgicas. En la actualidad, la temperatura de vapor más alta permisible en la entrada de la turbina es de aproximadamente 620 °C (1 150 °F).

Cualquier incremento en este valor depende del mejoramiento de los materiales actuales o del descubrimiento de otros que puedan soportar temperaturas más altas.

Una de las finalidades más importantes de este ciclo es obtener el vapor en estado más seco, pues, en un generador que utiliza como medio de conversión de energía una turbina, es necesario protegerlo ante daños causados por el efecto de la cavitación.

Cuando se utiliza vapor para cogeneración, es necesario eliminar la humedad que puede producir burbujas que viajan a zonas de alta presión e implosionan contra el rotor, produciendo una estela de gas y un arranque de metal de la superficie.

Figura 15. **Daños ocasionados por cavitación en una turbina de vapor**



Fuente: *Daños ocasionados por cavitación en una turbina de vapor*. <http://leydis-em.blogspot.com/2007/11/npsh-net-positive-suction-heat.html>. Consulta: junio de 2015.

### 2.3.3. Rankine recalentado

El ciclo de Rankine con recalentamiento surge del fenómeno presentado en el ciclo de Rankine simple, en el cual se obtiene una alta eficiencia térmica, pero que incrementa el contenido de humedad del vapor a niveles que no son deseables dentro del ciclo.

Por el motivo anterior, se debe solucionar el problema del aprovechamiento de la mayor eficiencia obtenida a presiones más altas que en el interior de la caldera, sin la necesidad de tener que enfrentar el problema de humedad excesiva en las etapas finales de la turbina.

Las tablas de propiedades de vapor dan dos posibles soluciones:

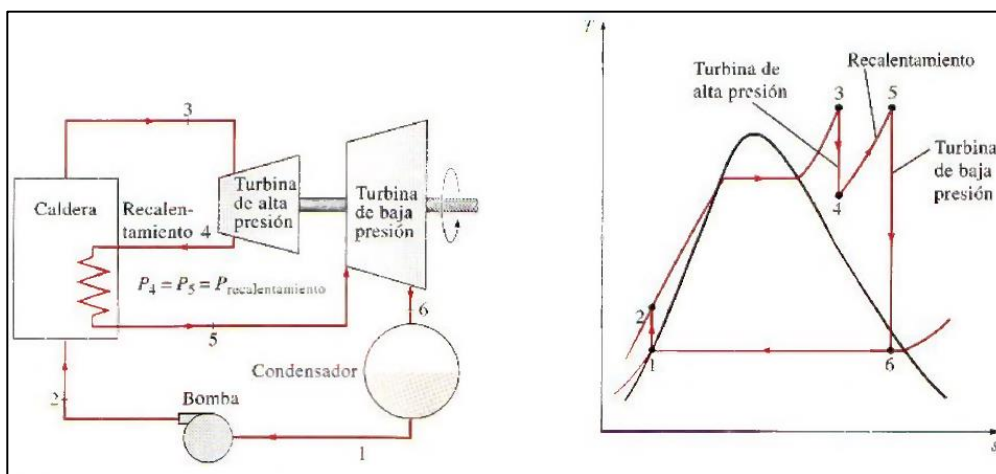
- Elevar a temperaturas muy altas el vapor antes de que entre a la turbina, lo que incrementaría la eficiencia del ciclo. Esto sería una condición de inseguridad, pues las temperaturas y presiones serían metalúrgicamente críticas.
- Es posible expandir el vapor de la turbina en dos etapas (alta y baja) y recalentarlo entre ellas. Es decir, partiendo del ciclo de Rankine simple, se elevaría la temperatura a la salida de la etapa de sobrecalentamiento, se recalienta dicho vapor.

El ciclo de Rankine con recalentamiento tiene su variación respecto del ciclo de Rankine simple en que en el primero el proceso de expansión se realiza en dos etapas, siendo estas:



- El vapor se expande isentrópicamente hasta una presión intermedia y regresa a la caldera donde se aplica en recalentamiento a presión constante. Esta temperatura es hasta la temperatura de entrada de la primera etapa (turbina de alta presión)
- El vapor se expande isentrópicamente en la segunda etapa (etapa de baja presión) hasta la presión del condensador.

Figura 16. **Ciclo de Rankine con recalentamiento**



Fuente: CENGEL, Yunus; BOLES, Michaels. *Termodinámica*. p. 575.

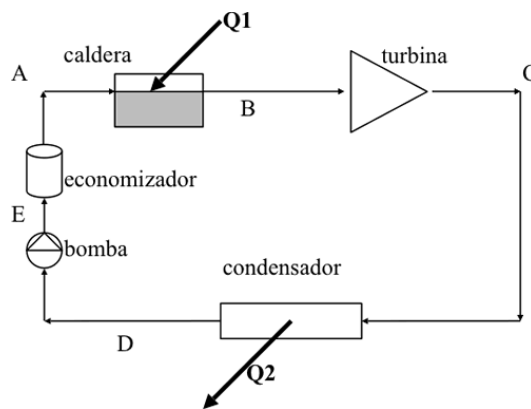
El propósito primordial del recalentamiento es reducir el contenido de humedad del vapor en las etapas finales del proceso de expansión.

#### 2.3.4. Rankine recuperativo

Son ciclos que tienen como objetivo la recuperación de calor perdido que se puede dar durante todo el ciclo de Rankine, sea cual sea.

La idea de la recuperación de calor perdido es obtenerlo y aprovecharlo para el agua de alimentación de la caldera. Se dispone de intercambiadores de calor, en los cuales el fluido caliente (gases de escape producidos por la combustión) transfiere su calor al agua que entra a la caldera para posteriormente convertirse en vapor y completar el ciclo correspondiente.

Figura 17. **Recuperación de calor con economizador**



Fuente: CENGEL, Yunus; BOLES, Michaels. *Termodinámica*. p. 120.

Los economizadores son intercambiadores de calor que consisten en grupos de tubos colocados en el paso de los gases de combustión, en cuyo interior circula el agua de alimentación de la caldera. Dicho proceso de calentamiento colabora en el ahorro del combustible, pues disminuirá su uso para elevar la temperatura del agua hasta obtener las condiciones de vapor deseadas.

Estos economizadores se encuentran ubicados al final del camino de los gases de combustión en el hogar de la caldera. Los economizadores también están propensos a la corrosión, por lo cual el agua que va dentro de estos debe estar debidamente tratada. También es necesario asegurarse de mantener la

temperatura lo suficientemente alta, la finalidad de esto es impedir la formación de ácidos corrosivos.

### 2.3.5. Eficiencia

La eficiencia de una caldera corresponde a la razón entre el calor absorbido durante el proceso y el calor liberado en el equipo. La diferencia entre el calor liberado y el calor absorbido corresponderá a las pérdidas de calor de la caldera.

La caldera es uno de los intercambiadores de calor que más combustible necesita para la generación de vapor, por tal motivo es necesario que funcione con altas eficiencias, lo que resulta en un mejor aprovechamiento de los recursos para generar vapor y buena calidad del producto final.

$$n = 1 - \frac{q_{salida}}{q_{entrada}} \quad (\text{Ecuación 1})$$

El  $q_{salida}$  se refiere al calor que sale con el vapor, este puede ser calculado utilizando las tablas de vapor e identificando los valores de entalpía para los estados dados. Esto depende del ciclo con el que se esté trabajando, dicho de otra forma, es la resta de energías antes y después del condensador, que es la última etapa antes de reiniciar el ciclo.

El  $q_{entrada}$  se refiere al calor suministrado durante los ciclos de adición de calor. Los valores que determinan dicho calor son las entalpías que se encuentran en las tablas de vapor durante los ciclos de adición de calor en la caldera y en el sobrecalentador. Dicho de otra manera, es una resta de energías entálpicas entre los valores antes de ingresar a la turbina y antes de que el líquido comprimido ingrese a la caldera, específicamente en el domo.

### **3. PRODUCCIÓN DE VAPOR EN CALDERAS ACUOTUBULARES**

#### **3.1. Cambio de fase de agua de alimentación**

- Líquido comprimido: es el agua contenida dentro de un recipiente en un sistema de vapor a una presión determinada. A medida que se le transfiere calor, el agua en estado líquido se expande poco a poco y por consiguiente aumenta su volumen específico.

Ya que se encuentra en un sistema cerrado, a medida que la temperatura aumenta el agua aún se encuentra en estado líquido, sin embargo, a medida que se le agrega calor se vaporiza algo de agua, empieza a darse el cambio de fase líquida a vapor. A un líquido que está a punto de evaporarse se le llama líquido saturado, está a una temperatura mínima de adición de calor para cambiar de estado líquido a gaseoso (vapor).

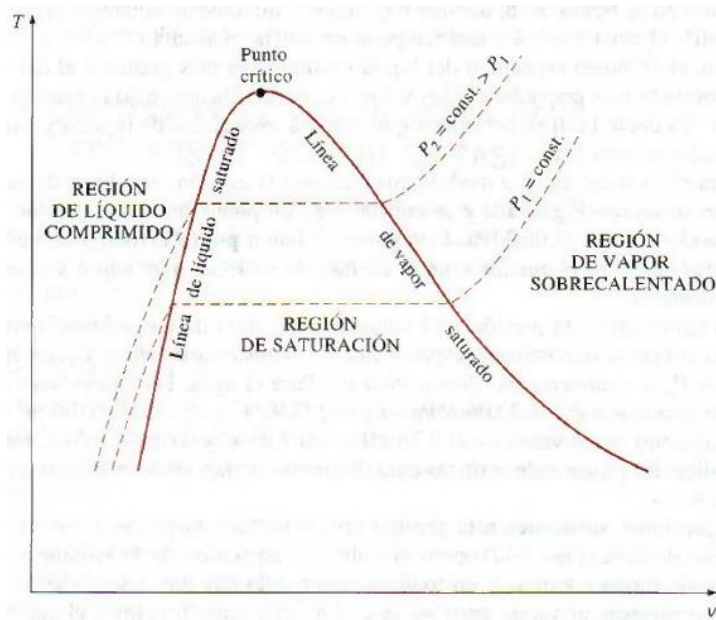
- Vapor: es un estado resultante de la adición de calor al agua, el vapor saturado es aquel que está a punto de convertirse de nuevo en líquido, provocado por la pérdida de temperatura comúnmente liberada al medio que lo rodea. El vapor sobrecalentado es el vapor que no está a punto de condensarse, es aquel donde la temperatura es lo suficientemente alta para conservar las propiedades de dicho vapor.

Para que exista un cambio de estas fases en cualquiera de los dos estados, es necesario llegar a la temperatura de saturación, que es la temperatura a la que una sustancia pura cambia de fase en cualquier sentido.

### 3.2. Mezcla de vapor de agua (vapor húmedo) y calidad del vapor

Se conoce como vapor húmedo, o mezcla saturada de líquido-vapor, al estado en el cual las fases líquida y de vapor coexisten en equilibrio. Para conocer estos estados es necesario identificar el llamado punto crítico, el cual se define como el punto en el que los estados líquido saturado y vapor saturado son idénticos.

Figura 18. Diagrama de cambio de fase líquido – vapor



Fuente: CENGEL, Yunus; BOLES, Michaels. *Termodinámica*. p. 129.

Durante un proceso de evaporación, una sustancia existe como una parte líquida y otra de vapor, es decir, es una mezcla de líquido saturado y vapor saturado, para conocer las propiedades de manera apropiada de esta mezcla, es necesario conocer las proporciones que la componen. Esto se consigue definiendo una propiedad llamada calidad o título  $x$ , que es la razón entre la masa de vapor y la masa total de la mezcla. La calidad, del vapor tiene valor solo para el vapor húmedo y, dado que es una relación de masas, se define en valor entre 0 y 1. La calidad de un sistema compuesto por líquido saturado es 0 (0 %) y la de uno compuesto por vapor saturado es 1 (100 %), la calidad de vapor se calcula mediante la siguiente fórmula.

$$x = \frac{m_{vapor}}{m_{total}} \quad (\text{Ecuación 2})$$

### **3.3. Vapor saturado**

Es aquel que se encuentra a la temperatura de ebullición correspondiente a su presión absoluta, por lo tanto, es un vapor que se encuentra en contacto y en equilibrio con agua líquida.

#### **3.3.1. Obtención**

El vapor saturado es aquel que está a punto de convertirse de nuevo en líquido, por la pérdida de temperatura comúnmente liberada al medio que lo rodea. La pérdida se da por enfriamiento directo o indirecto. En el primero ocurre condensación debido al equilibrio térmico con el entorno que lo rodea; el segundo es cuando se aprovecha el calor producido por el vapor y es cedido a otro medio a través del contacto directo o indirecto del proceso.

Figura 19. **Diagrama de región de vapor saturado**



Fuente: CENGEL, Yunus; BOLES, Michaels. *Termodinámica*. p. 131.

### 3.3.2. Usos

El vapor saturado es utilizado como la fuente de calentamiento para fluido de proceso en intercambiadores de calor, reactores, reboilers, precalentadores de aire de combustión y otros tipos de equipos que tengan como función primordial la absorción de calor, tal es el caso del planchado, tinturado, esterilizado, blanqueado, humidificación, entre otros.

### 3.3.3. Características

Las características de vapor saturado con respecto del vapor sobrecalentado son:

- Presiones mayores
- Temperaturas menores, lo que provoca la condensación
- Volúmenes específicos inferiores
- Energías internas inferiores
- Entalpías inferiores

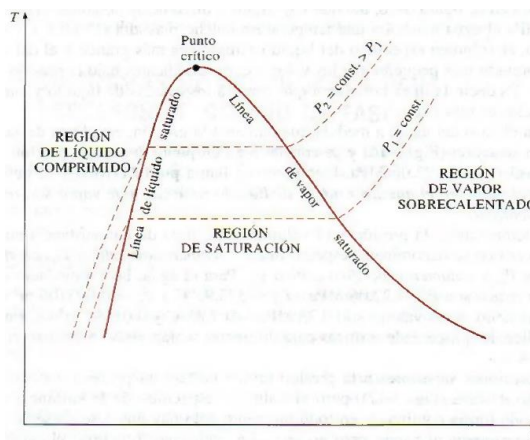
### 3.4. Vapor sobrecalentado

Es el que se encuentra a una temperatura superior a su temperatura de saturación.

#### 3.4.1. Obtención

Al existir un cambio de fase de líquido a gaseoso, se puede calentar el vapor hasta obtener características deseadas del proceso. Una vez pasada la fase de vapor saturado, existe un vapor que no está a punto de condensarse y se le denomina vapor sobrecalentado.

Figura 20. Diagrama de región de vapor sobrecalentado



Fuente: CENGEL, Yunus; BOLES, Michaels. *Termodinámica*. p. 138.



### **3.4.2. Usos**

Debido a que existen procesos o dispositivos que requieren características de vapor sobrecalentado, los usos se limitarán a la cogeneración, la cual consiste en la generación de energía eléctrica partiendo de energía térmica producida en la caldera y transferida por medio del vapor.

### **3.4.3. Características**

Las características del vapor sobrecalentado son relativas al otro tipo de vapor que se obtiene en la caldera, el vapor saturado, estas son:

- Presiones menores
- Temperaturas superiores
- Volúmenes específicos superiores
- Energías internas superiores
- Entalpías superiores

### **3.5. Balance de masa agua-vapor**

Es el procedimiento que permite tener un cálculo de energía consumida en el proceso. Para que este procedimiento sea válido, es necesario que los datos registrados sean tomados cuando el equipo o instalación se encuentre operando en condiciones de variables estables. Es importante hacer notar que existen diversos cálculos de balances que se pueden estudiar, sin embargo, el enfoque de dicho estudio es específicamente para el agua consumida y el vapor generado.

El balance de masa agua - vapor es importante, pues partiendo del principio de conservación de la energía la cantidad de agua que entra a la caldera debe ser igual a la cantidad de vapor generado que sale desde la caldera hacia los diversos procesos que lo requieran, partiendo de la siguiente ecuación, obtenemos:

$$\Sigma m_{entrada} = \Sigma m_{salida} \quad (\text{Ecuación 3})$$

Donde:

$\Sigma m_e$  = masa de agua entrante a la caldera

$\Sigma m_s$  = masa de vapor producido por la caldera

Para determinar las condiciones del caudal de agua de alimentación requeridas de la caldera debemos de conocer:

- Presión de trabajo: la presión de agua de alimentación debe ser mayor que la presión en el domo, para que pueda ingresar sin problemas.
- Uso: si el vapor producido será para procesos donde es necesario el calor, si el vapor producido será para utilizado para cogeneración.
- Tratamiento de agua: será analizado por personal con conocimiento en tratamiento de agua, para determinar las cantidades de químicos a agregar.
- Capacidad de generación de vapor: con esta condición se determinara la cantidad de agua que debe estar disponible para la alimentación de la caldera, si la caldera cuenta con deareador, es necesario que tenga la

capacidad de almacenamiento requerida con la temperatura correcta de calentamiento.

Para fines de cálculos en el balance de masa y vapor se utilizará el siguiente cálculo como ejemplo, es importante resaltar que dicho cálculo es en un instante dado, esto se aprecia mejor ante cambios de demanda de vapor.

$$SP = K1 * X + Y - K2 \quad (\text{Ecuación 4})$$

Donde:

K1 = rango de medidor vapor (masa) / rango de medidor de agua (masa).

X = medida de caudal de vapor (instantáneo).

Y = salida de controlador de nivel (50 %).

K2 = 50 % (margen de control ante aumentos o disminuciones de demanda).

SP = punto de consigna para el controlador de flujo de agua de alimentación de la caldera.

Rvapor/Ragua (K1) = 1,167 (compensación de flujo para sistema de control)

Producción de vapor (X) = 40 Ton/h (63,5 % del flujo de vapor)

Salida controlador nivel (Y) = 50 %

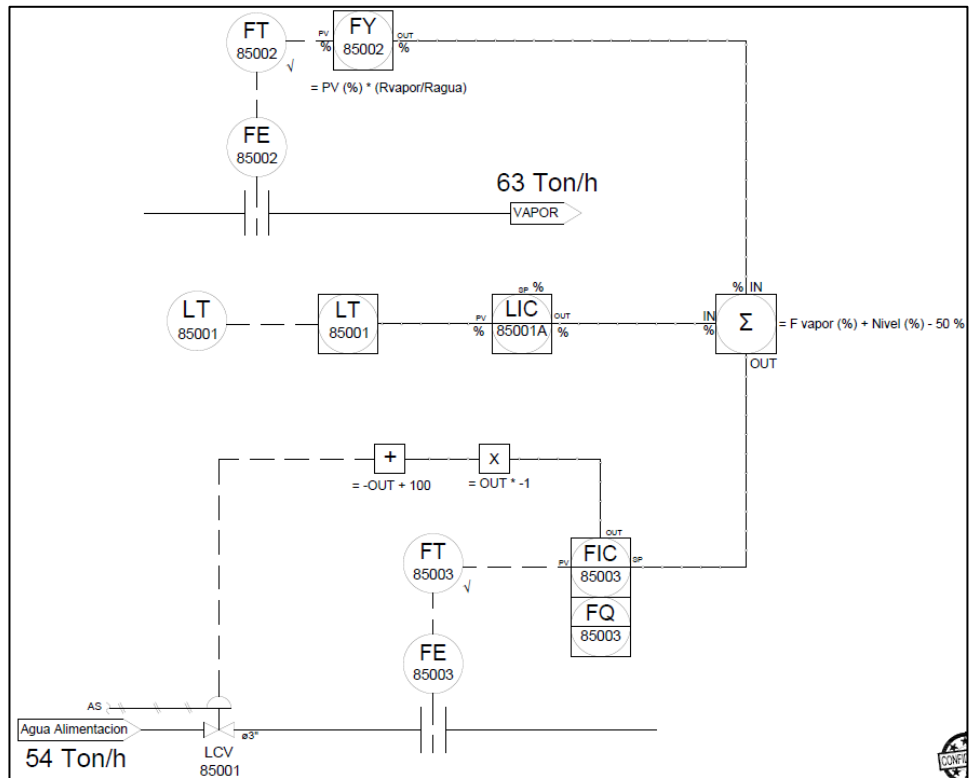
K2: 50 %

$$SP = 1,167 * 63,5 \% + 50 \% - 50 \% = 74,08 \%$$

Dicho de otra manera, es necesario que el flujo de agua sea el 74,08 % de su rango de operación (0 – 54 Ton/h). Esta corrección la realiza el FIC-85003, cuando se le fija el valor de la sumatoria, esto es:

$$74,08 \% * 54 \text{ Ton/h} = 40,005 \text{ Ton/h}$$

Figura 21. Diagrama PID de proceso para control de tres elementos



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD.

Cuando existe alguna diferencia entre el agua de entrada y el vapor de salida, se pueden presentar dos escenarios:

- Mayor caudal de agua de alimentación
  - Sabiendo que no existen fugas en el sistema, comprobado a través de prueba hidrostática, la combustión no es lo suficientemente regular para generar el vapor, esto puede ser consecuencia de tres factores: aire de combustión insuficiente,

fuente calor menor que la requerida (llama pequeña) o combustible con bajo poder calorífico.

- Un mayor caudal de alimentación es una condición indeseable, pues el nivel en el domo de la caldera empieza a acumularse (arriba de 50 %), lo que provocará un arrastre de agua en el vapor de salida, condición crítica en caso que el vapor se utilice para cogeneración por medio de turbina.
- Mayor caudal de vapor de salida: esta es la condición más crítica para el funcionamiento de una caldera. El caudal de vapor de salida puede ser mayor al caudal de agua de alimentación debido a:
  - Bajo caudal de alimentación, efecto provocado por el dimensionamiento de la bomba.
  - Fugas en el sistema de alimentación.
  - Tamaño de la tubería de alimentación.
  - Válvula de agua de alimentación con curva característica no apropiada.

Un mayor caudal de vapor producido en una caldera es más peligroso que una mayor alimentación de agua, pues en el segundo caso la probabilidad de explosión del domo no ocurre, mientras que en el primero, el vapor producido puede llegar a ser mayor y el domo se quedará sin agua, ocasionando una explosión por sobrepresión en el domo.

## **4. CONTROL DEL PROCESO PARA LA PRODUCCIÓN DE VAPOR**

### **4.1. Filosofía de control y descripción del control del nivel del domo**

Cuando el caudal de vapor aumenta bruscamente, la presión baja, con lo que se produce una vaporización rápida que fuerza la producción de burbujas y agua, lo que da lugar al aumento aparente de nivel de la caldera.

El motivo de control del nivel del domo es cuando la demanda de vapor disminuye, la presión dentro del domo aumenta y las burbujas reducen su tamaño y colapsan. Este efecto provoca un decrecimiento en el nivel de agua del domo (el nivel parece disminuir) y puede producirse un efecto mayor si el caudal de agua aumenta demasiado.

La importancia de controlar el nivel del domo radica en los cambios bruscos que este pueda sufrir debido a las altas o bajas demandas de vapor. Las demandas de vapor vienen condicionadas directamente por el proceso requerido. Los procesos demandantes de vapor en la planta son:

- Tinturado
- Planchado
- Lavado
- Blanqueado
- Estampado
- Servicios
- Cogeneración

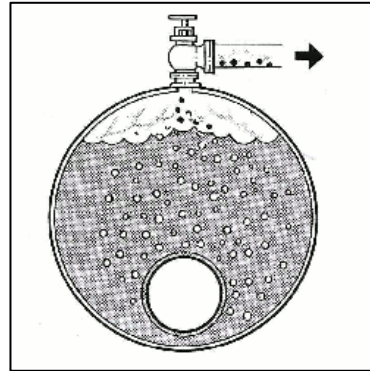
Los posibles escenarios que se pueden presentar ante las demandas de vapor son los siguientes:

Demanda alta de vapor se da cuando se requiere un caudal de agua relativamente mayor, lo necesario para que al producir vapor en alta demanda, el domo no se quede sin agua y se mantenga el nivel en el valor necesario para que no exista arrastre de agua en el vapor.

Cuando la demanda disminuye, ante un cambio de demanda alta a demanda baja, es necesario una regulación del caudal de agua de alimentación al domo, reduciéndolo, pues de lo contrario, aumentaría el nivel por encima del valor deseado y, de nuevo, partículas de agua viajarían en el vapor, pues el nivel se encontraría muy cerca de la salida de vapor. Para una demanda baja de vapor: Se requiere un caudal relativamente menor, lo necesario para mantener el nivel ante una producción de vapor menor.

Cuando la demanda aumenta por uno o más procesos, de demanda baja a demanda alta, el nivel del domo aumenta por el efecto del arrastre de vapor, lo que provocaría que partículas de agua viajen en el vapor, condición crítica para el proceso de cogeneración. Ante tal escenario, es necesario regular el caudal de agua de alimentación.

Figura 22. **Efecto de arrastre de agua por demanda alta de vapor**



Fuente: *Efecto de arrastre de agua por demanda alta de vapor*. <http://www.leermas.com/lallave/news64/info2.php>. Consulta: junio de 2015.

El punto principal de esta estrategia es mantener el balance de masa entre el agua que ingresa y el vapor que egresa del domo y, al mismo tiempo, mantener el nivel de agua cercano a un *setpoint* especificado.

También es necesario proteger la caldera y los equipos que intervienen en la generación de vapor ante la ausencia o aumento excesivo del agua de alimentación, por tal motivo se instalará un mecanismo de seguridad que apagará la caldera en tres casos:

- Disminución del nivel de agua del domo en un punto definido.
- Aumento excesivo del nivel de agua del domo en un punto definido.
- Disminución del nivel de agua en el deareador o desgasificador en un punto definido.



El mecanismo de seguridad para apagar la caldera constará de una cadena de enclavamientos (*interlock*) que tendrán acción física directa y de monitoreo en el sistema de control.

#### **4.1.1. Descripción del control del proceso**

Para que las condiciones de funcionamiento sean estables, el caudal de vapor y el de agua deben ser iguales y, de forma secundaria, el nivel de agua debe reajustarse periódicamente para que se mantenga dentro de los límites determinados ( $\pm 2$  pulgadas por encima y por debajo de la línea que marca el centro del domo de la caldera).

Las tres variables que intervienen en el control de nivel de domo son:

- Caudal de vapor
- Caudal de agua de alimentación
- Nivel del domo

Para que las tres variables anteriormente descritas funcionen integralmente, los instrumentos de medición están relacionados entre sí de varias formas, la descripción del proceso es representada mediante un diagrama de proceso e instrumentación PID (ver figura 21).

El diagrama PID describe la estrategia de control utilizada, en la cual una señal anticipada (*feedforward*) del caudal de vapor se superpone al control de nivel y todas tienen por objeto dar prioridad a las diferencias entre los caudales de agua y vapor frente a las variaciones de nivel que pueden producirse ante una alta demanda. Es decir, el sistema de control en estas condiciones actúa

obedeciendo a la diferencia relativa de caudales con preferencia a los cambios en el nivel.

Para lograr este objetivo, se utiliza una estrategia en cascada combinada con una compensación en prealimentación (*feed forward*). El bloque de control primario (PFF: proporcional + *feed forward*) compara el nivel verdadero con el nivel de SP y genera una señal de error que es multiplicada por un factor y luego sumada al caudal de vapor. Esta señal representa el caudal de agua que el domo necesita para alcanzar el nivel de *setpoint* en unos momentos, por lo que es el *setpoint* del bloque secundario (PI: proporcional + integral).

Seguidamente, el bloque secundario abre y cierra la válvula de agua de alimentación para seguir a dicho *setpoint*, comparando el *setpoint* de caudal de agua con el caudal de agua real y aplicando un algoritmo proporcional e integral.

En condiciones ideales, sin pérdidas o fugas de agua o vapor, en cuanto el nivel alcanza su *setpoint*, el error en el primer controlador es nulo, de modo que el *setpoint* del segundo controlador es igual al caudal de vapor. De esta manera, en estado estacionario el caudal de agua es igual al vapor de salida y el nivel es el correcto.

La medida del caudal de vapor se realizará utilizando un elemento de medición por presión diferencial, con placa de orificio. La medición del flujo de agua de alimentación también se realizará utilizando presión diferencial con placa de orificio.

## **4.2. Conocimientos básicos de control**

Se describen los conocimientos básicos de control como la variable de proceso, punto de consigna, entre otros.

### **4.2.1. Variable de proceso (PV)**

Es la variable a medir en el proceso y es la que se desea controlar, esta se mide con tecnología de instrumentación de campo. Para el control de nivel de la caldera acuotubular las tres variables de proceso a medir son:

- Nivel del domo de la caldera, medido en una escala de 0 a 100 %.
- Flujo de agua de alimentación a la caldera, medido en galones por minuto.
- Flujo de vapor producido en la caldera, medido en libras por hora.

Las unidades de ingeniería anteriormente indicadas, pueden variar para fines de cálculos, sin embargo, en las pantallas de operación en tiempo real, las unidades de ingeniería deberán coincidir, con lo cual se apreciará el control que mantiene el balance de masa para el caso de los flujos de agua y vapor.

Las unidades de ingeniería para la medición del nivel serán constantes en todo momento, es decir, en una medida porcentual.

Para medir dichas variables se debe conocer su funcionamiento basado en tres partes:

- Elemento primario o sensor: es el elemento que tiene contacto directo con la variable de proceso, utiliza o absorbe energía para dar al sistema

de medición una indicación en respuesta a la variación de la variable controlada. El efecto producido por el elemento primario puede ser un cambio de presión, fuerza, posición, medida eléctrica, entre otros.

- Elemento intermedio: es el elemento encargado de enlazar el elemento primario con el elemento secundario.
- Elemento secundario o transmisor: capta la variable de proceso a través del elemento primario y la transmite a distancia en forma de señal neumática, hidráulica o eléctrica.

El elemento primario puede formar parte integral del transmisor como lo es el caso de los medidores de flujo por presión diferencial utilizados en la medición de flujo de agua y vapor.

#### **4.2.2. Punto de consigna**

Es el valor que se desea obtener de la variable de proceso. Este es definido por el proceso que lo requiera, puede ser constante o variable y, desde un punto de vista de seguridad, puede ser interno o externo.

- Punto de consigna interno: no es modificable a nivel de operario, es decir, es interno del sistema y solo puede ser manipulado con permisos especiales.
- Punto de consigna externo: el operario normalmente tiene acceso y permiso para modificarlo. Para realizar una modificación en el punto de consigna del sistema se deben tener los conocimientos y el criterio necesario.

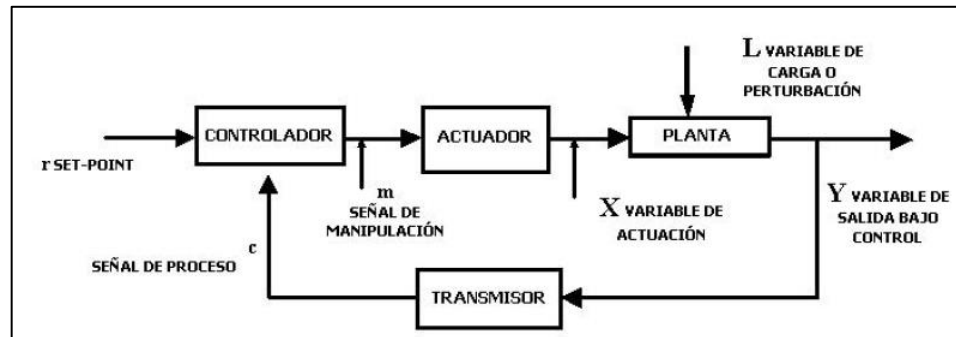
- Punto de consigna constante: tal y como lo indica su nombre, no es modificable y para el caso del proceso del control de nivel del domo, el punto de consigna constante es el nivel del domo, es decir  $SP = 50 \%$ .
- Punto de consigna flotante: su valor varía en función de las condiciones de operación del proceso. Para el caso del control de nivel del domo, se tiene con un controlador para el flujo de agua de alimentación, este es el encargado de igualar la cantidad de agua de alimentación en función de la cantidad de vapor producida. El punto de consigna flotante es entonces el flujo de agua de alimentación para la caldera.

#### **4.2.3. Variable manipulada**

Es el elemento correctivo utilizado para obtener el valor deseado del punto de consigna. Para el caso del flujo de agua de alimentación de la caldera, en el instante en que ocurre un aumento en la demanda de vapor, la acción a realizar por el controlador es alimentar con igual cantidad de agua la caldera, a través de un elemento final de control.

El elemento final de control a utilizar es una válvula, la cual tendrá una acción directamente proporcional al punto de consigna. Al aumentar el flujo de vapor, la válvula se abrirá un porcentaje calculado por el controlador, con lo que también aumentará el flujo de agua de alimentación. Así se obtiene el punto de consigna deseado para la variable de proceso, es decir, igualar el flujo de agua al flujo de vapor, manipulando la válvula de agua de alimentación.

Figura 23. Esquema de control básico



Fuente: *Esquema de control básico*. <http://www.analytictech.com/mb021/motivation.htm>

Consulta: junio de 2015.

### 4.3. Instrumentación

A continuación se presentan los elementos de la instrumentación utilizada en el control de la caldera.

#### 4.3.1. Campo de medida (rango)

Es el conjunto de valores de la variable medida que están comprendidos dentro de los límites superior e inferior de la capacidad de medida o de transmisión del instrumento. El rango se expresa estableciendo los dos valores extremos.

Dicho de otra forma, es el campo de medida para cualquier número de valores que siempre deben estar entre un límite superior y otro inferior según las especificaciones del instrumento.

### **4.3.2. Alcance (*span*)**

Es la diferencia algebraica entre los valores superior e inferior del campo de medida del instrumento, es el equivalente al área de operación del instrumento.

### **4.3.3. Error**

Se refiere a la diferencia algebraica entre el valor leído o transmitido por el instrumento y el valor real de la variable medida. Los diferentes tipos de error son los siguientes:

- Error estático: este tipo de error se presenta cuando existe un régimen permanente de operación.
- Error dinámico: es la diferencia durante el período transitorio, es decir, el tiempo que tarda la señal de respuesta en establecerse. En condiciones dinámicas el error varía considerablemente debido a que los instrumentos tienen características comunes a los sistemas físicos, absorben energía del proceso y esta transferencia requiere cierto tiempo para ser transmitida, lo que genera retardos en la lectura real en el instrumento. Este error depende, en su mayoría, del sensor y de las condiciones de la variable a medir.
- Error medio: es el promedio de los errores en cada punto de medición, para todos los valores crecientes y decrecientes de la variable de proceso medida.

#### **4.3.4. Exactitud**

Es la característica que posee un instrumento de medición de tender a dar lecturas próximas al verdadero valor de la magnitud medida, es decir cuando la lectura se acerca al valor real de la variable.

#### **4.3.5. Precisión**

Es la capacidad de un instrumento de dar el mismo resultado en mediciones diferentes realizadas en las mismas condiciones. Esta cualidad debe evaluarse a corto plazo. No debe confundirse con exactitud ni con reproducibilidad.

#### **4.3.6. Variables medidas**

Se refiere a las variables que influyen directamente en el proceso de control de nivel del domo.

##### **4.3.6.1. Nivel**

En la industria, la medición de nivel es una variable sumamente importante, tanto desde el punto de vista de funcionamiento correcto del proceso como de la consideración del balance adecuado de materias primas o de productos finales. Para la aplicación de control de nivel del domo, esta es la variable principal a monitorear y controlar, pues existen tres posibles estados a presentarse para dicha variable:

- Nivel bajo: es el estado más crítico. De existir ausencia de agua por debajo del nivel permitido, existe la posibilidad de que ocurra una



explosión en el domo por alta presión, ante tal escenario es necesario apagar la caldera.

- Nivel normal: es el estado deseado e ideal de funcionamiento. Durante este estado, la demanda de vapor puede aumentar o disminuir sin afectar el nivel dentro del domo.
- Nivel alto: es un estado no deseable que puede provocar daños a la turbina por el arrastre de vapor, sin embargo, se reduce la probabilidad de explosión en el domo por sobrepresión, ante tal escenario es necesario apagar la caldera.

#### **4.3.6.2. Flujo**

En mecánica de fluidos, el caudal es la cantidad de fluido que circula a través de una sección del ducto por unidad de tiempo, a menudo se identifica con el flujo volumétrico o volumen que pasa por un área dada en la unidad de tiempo. Existen aplicaciones donde es necesario medir el flujo másico o masa que pasa por un área dada en la unidad de tiempo.

Para el control de procesos del nivel del domo y partiendo del balance de masa, principalmente se medirán dos flujos:

- Flujo de agua de alimentación: corresponde a la medición del caudal de agua de alimentación que entra al domo de la caldera, este debe cumplir con dos condiciones de operación:
  - Caudal necesario en función de las capacidades de producción de vapor.

- Presión adecuada de alimentación, esta debe ser mayor que la presión interna del domo.
- Flujo de vapor generado: corresponde a la medición de vapor de salida generado dentro de la caldera, este debe cumplir con las siguientes condiciones:
  - Calidad de vapor adecuada para la aplicación de cogeneración
  - Presión de vapor sobrecalentado.
  - Temperatura de vapor sobrecalentado

#### **4.3.6.3. Temperatura**

Las limitaciones del sistema de medida quedan definidas en cada tipo de aplicación por la precisión, la velocidad de captación de la temperatura, la distancia entre el elemento de medida y el aparato receptor, y el tipo de instrumento indicador.

Esta variable será medida durante el proceso, no formará parte del control de proceso, sin embargo, se utilizará, para determinar las condiciones de agua y vapor.

- Temperatura de agua: es la medición que se realiza al agua de alimentación con la finalidad de determinar características como entalpía y entropía, estas dos utilizadas para fines de cálculos.
- Temperatura de vapor: es la medición que se realiza al vapor de salida generado dentro de la caldera, con la finalidad de determinar el estado del vapor, utilizando las tablas características de este.

#### **4.3.6.4. Presión**

Es una fuerza por unidad de superficie y puede expresarse en unidades como pascal, bar, atmósferas, kilogramos por centímetro cuadrado y libras por pulgada cuadrada. La presión será medida y utilizada únicamente como monitoreo, pues no influye en el control de nivel.

Las presiones a medir durante el control del proceso serán utilizadas únicamente con fines de monitoreo, no influirán en el control. Se realizará una estrategia por separado en la cual tendrá influencia directa, las presiones medidas son:

- Presión de agua de alimentación: esta presión será medida y monitoreada. Con esta presión y con la medición de temperatura se pueden conocer los estados de lo que se llama líquido comprimido.
- Presión de vapor: esta presión será medida y monitoreada, utilizándola junto con la medición de temperatura es posible determinar las características del vapor y, con esto, determinar qué tipo de vapor se obtiene a la salida.
- Presión interna del domo: es la medición de la presión producida en el interior del domo. Es una variable que se utilizará como monitoreo y como medida de seguridad y de comparación con la presión de agua de alimentación.

### **4.3.7. Selección de tecnología a utilizar**

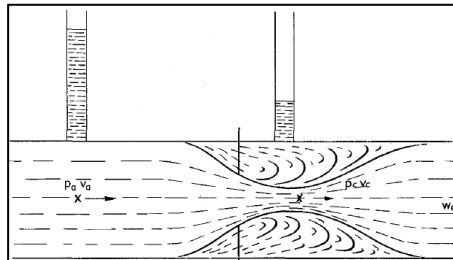
Existen diferentes tecnología a utilizar, a continuación se presentan varias de ellas.

#### **4.3.7.1. Presión diferencial**

Para llevar a cabo el balance de masa, es necesario obtener mediciones de entrada y salida, dichas mediciones son principalmente el flujo de agua y vapor. La medida de caudal en conducciones cerradas consiste en la determinación de la cantidad de masa o volumen que circula por la conducción por unidad de tiempo. El principio de medición seleccionado es el de presión diferencial, ya que implica costos bajos y una medición de interpretación directa, es decir, la medida de caudal es igual a la raíz cuadrada de la medida de la presión diferencial.

Hay que señalar que la medida del caudal volumétrico en la industria se efectúa principalmente con elementos que dan lugar a una presión diferencial al paso del fluido, la fórmula de caudal obtenida con los elementos de presión diferencial se basa en la aplicación del teorema de Bernoulli a una tubería horizontal (altura cinética + altura de presión + altura potencial = cte).

Figura 24. **Teorema de Bernoulli**



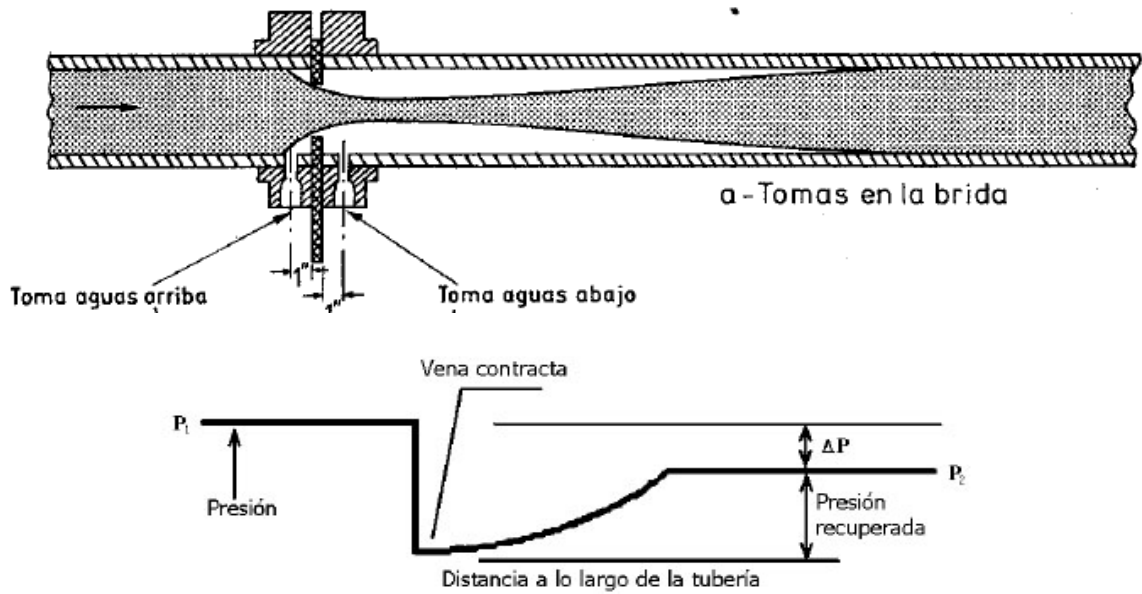
Fuente: *Teorema de Bernoulli*. [http://www.iberisa.com/soporte/cfd/cfd\\_faq.htm](http://www.iberisa.com/soporte/cfd/cfd_faq.htm). Consulta: junio de 2015.

Para la medición de caudal por presión diferencial, tanto para el agua de alimentación como para el vapor producido, se creará la presión diferencial utilizando placas de orificio.

La placa de orificio o diafragma consiste en una placa perforada instalada en la tubería. Dos tomas, conectadas antes y después de la placa, captan la caída y recuperación de presión (presión diferencial), la cual es proporcional al cuadrado del caudal.

Para realizar dicha medición se presenta un esquema de instalación y el comportamiento de las presiones durante el ciclo de operación, en la figura 25.

Figura 25. **Medición de presión diferencial**



Fuente: CREUS, Antonio. *Instrumentación industrial*. p. 116.

En dicha medición se utilizarán placas de orificio concéntricas, se recomienda el uso de este tipo debido a que es un fluido limpio y de baja viscosidad.

Figura 26. **Placa de orificio concéntrica**



Fuente: *Placa de orificio concéntrica*. <http://server-die.alc.upv.es/asignaturas/LSED/2003>.

Consulta: junio de 2015.

Para el diseño de la placa de orificio, es necesario conocer ciertas características del fluido a medir y de las condiciones del proceso.

- Datos de producción de caldera:
  - Flujo de agua:
    - Caudal nominal (producción estable que se espera obtener) = 290 GPM.
    - Caudal máximo (pico que pudiera presentarse) = 310 GPM.
    - Temperatura de agua nominal (en el punto donde se medirá el flujo de vapor) = 120 °C.
    - Presión de agua (en el punto donde se medirá el flujo de vapor) = 300 PSI.
    - Diámetro nominal de la tubería en la cual se medirá el flujo de vapor = 4 pulgadas.
    - Material de la tubería = acero al carbono.
    - Cédula de la tubería = 80.
  - Flujo de vapor:
    - Caudal nominal (producción estable que se espera obtener) = 140 000 lb/h.
    - Caudal máximo (pico que pudiera presentarse) = 1 450 000 lb/h.
    - Temperatura de vapor nominal (en el punto donde se medirá el flujo de vapor) = 270 °C.
    - Presión de vapor (en el punto donde se medirá el flujo de vapor) = 230 PSI.

- Diámetro nominal de la tubería en la cual se medirá el flujo de vapor = 10 pulgadas.
- Material = acero al carbono.
- Cédula de la tubería = 60.

#### **4.3.7.2. Software FE-Sizer**

Para dimensionar el tamaño de las placas de orificio, se utilizará la herramienta de software de diseño FE-Sizer, el cual es utilizado para dimensionar elementos de medición de flujo en sistemas de vapor con diferentes características. Este software es capaz de calcular todas las medidas necesarias para obtener mediciones de flujo exactas de vapor sobrecalentado y agua de alimentación en ductos cerrados.

El software incluye medidas, materiales y tablas de datos de tuberías, utiliza métodos y procedimientos que cumplen con normas que regulan el tamaño y las especificaciones de los dispositivos medidores.

- Cálculo de placa de orificio para medición de caudal de agua por presión diferencial, utilizando software de diseño FE-Sizer.

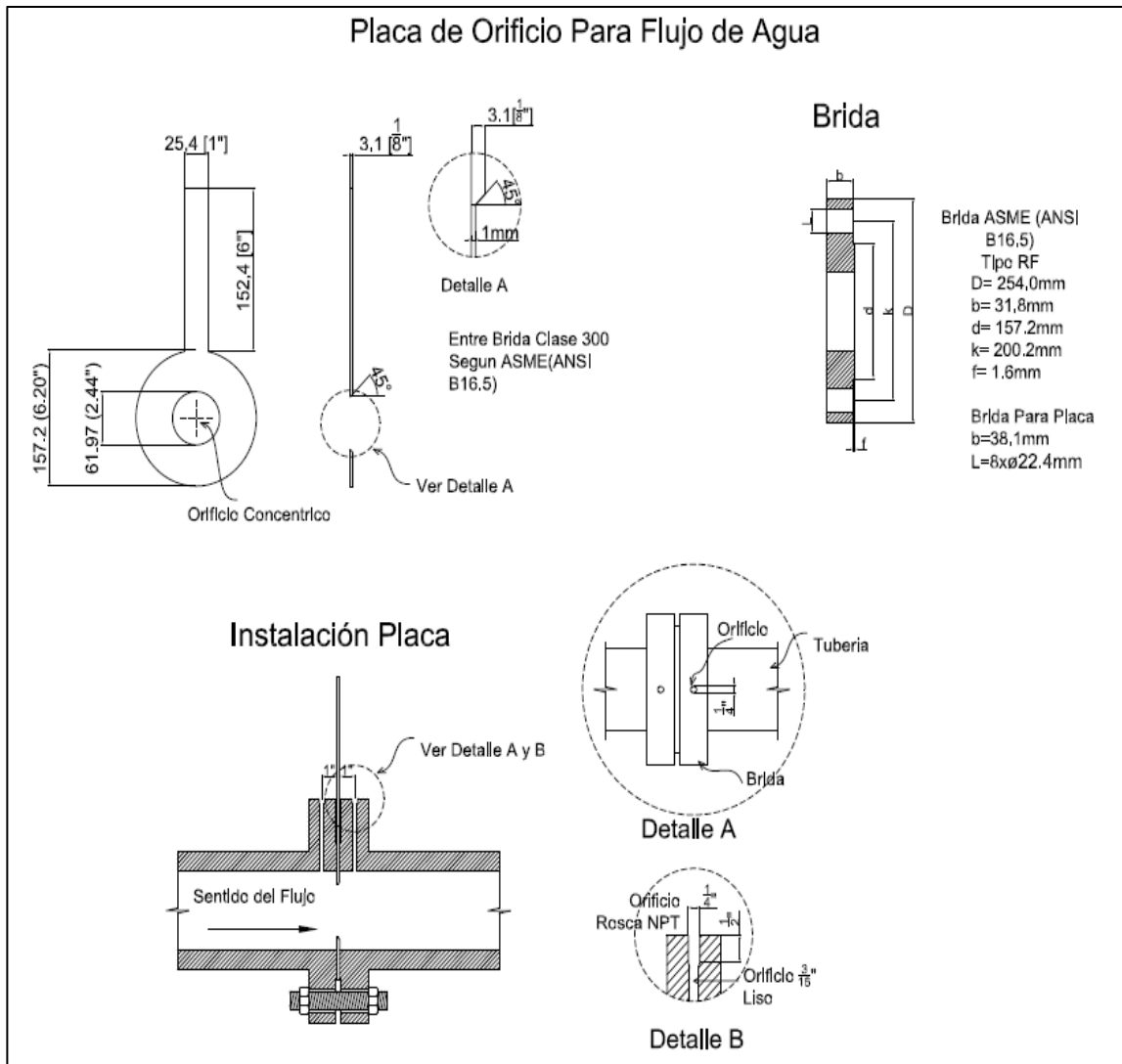


Figura 27. Cálculo de placa de orificio para medición de caudal de agua

CALCULO DE PLACA DE ORIFICIO	
Usuario:	X-X-X-X
Contacto:	X-X-X-X-X
Etiqueta (Tag) No.:	FE-85003
Aplicación:	<b>Flujo de Agua</b>
<b>Datos del Fluido</b>	
Fluido:	Agua
Presión nominal:	300psig
Temperatura nominal:	248 °F
Viscosidad $\mu$ :	0.23249 cPoise
<b>Datos de la tubería</b>	
Diámetro nominal:	4"
Material:	CS
Cédula:	80
Diámetro interno:	3.826"
<b>Estándar de cálculo</b>	
Tipo de placa:	Concéntrica
Según:	ASME MFC-3M (1989) / ISO 5167 (1991)
Ubicación de toma:	Flange Taps
Material de fabricación:	SS 316
<b>Datos de dimensionamiento</b>	
Q max:	310 GPM
Qn:	290 GPM
dPn:	200" H <sub>2</sub> O
<b>Datos de Placa</b>	
Beta calculada:	0.64
Orificio:	2.44 "
dPn:	175.03" H <sub>2</sub> O
Perdida permanente:	58.42 % del diferencial de presión @ caudal nominal.
Cálculo del 23 de Abril del año 2015 por Noé Yax, utilizando software FE-Sizer V3.0	

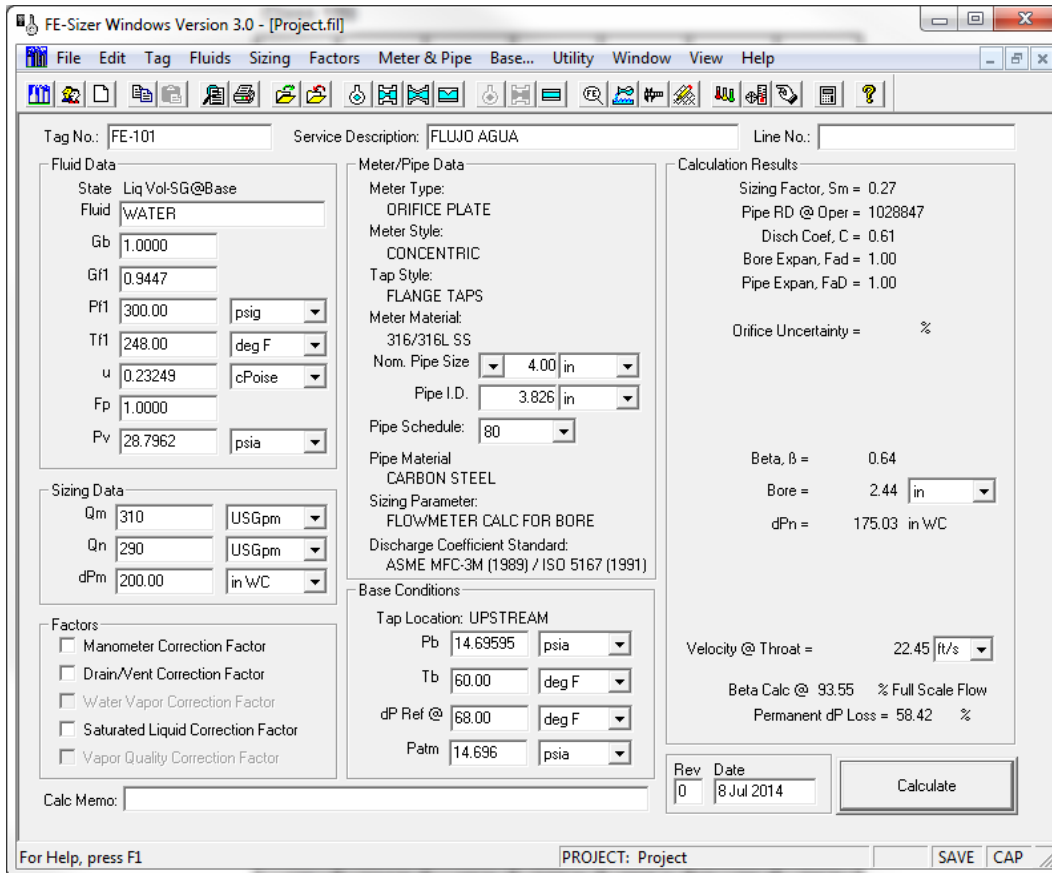
Fuente: elaboración propia, empleando FE-sizer.

Figura 28. **Diseño e instalación de placa de orificio para medición de flujo de agua**



Fuente: elaboración propia, empleando FE-Sizer.

Figura 29. Software FE-Sizer para dimensionar placas de orificio



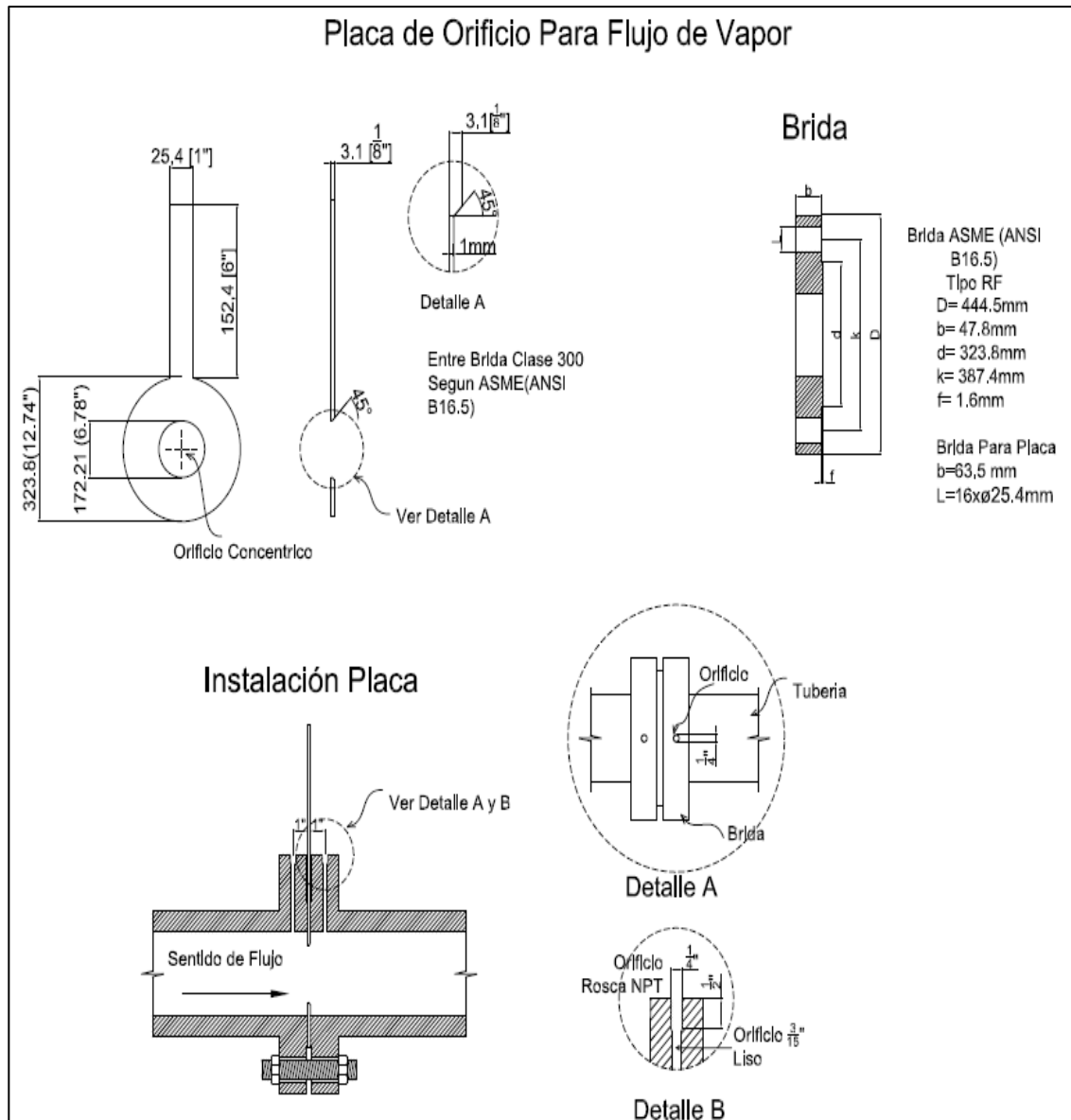
Fuente: elaboración propia, empleando Fe-Sizer.

Figura 30. **Cálculo de placa de orificio para medición de caudal de vapor sobrecalentado**

<b>CALCULO DE PLACA DE ORIFICIO</b>	
Usuario:	X-X-X-X
Contacto:	X-X-X-X-X
Etiqueta (Tag) No.:	FE-85002
Aplicación:	<b>Flujo de Vapor Sobre Calentado</b>
<b>Datos del Fluido</b>	
Fluido:	Vapor
Presión nominal:	230 psig
Temperatura nominal:	518 °F
Viscosidad $\mu$ :	0.01880 cPoise
<b>Datos de la tubería</b>	
Diámetro nominal:	10"
Material:	CS
Cédula:	60
Diámetro interno:	9.75"
<b>Estándar de cálculo</b>	
Tipo de placa:	Concéntrica
Según:	ASME MFC-3M (1989) / ISO 5167 (1991)
Ubicación de toma:	Flange Taps
Material de fabricación:	SS 316
<b>Datos de dimensionamiento</b>	
Q max:	150,000 lb/hr
Qn:	140,000 lb/hr (63.63 Ton/hr)
dPm:	400" H <sub>2</sub> O
<b>Datos de Placa</b>	
Beta calculada:	0.70
Orificio:	6.78 "
dPn:	348.44" H <sub>2</sub> O
Perdida permanente:	51.58 % del diferencial de presión @ caudal nominal.
Cálculo del 25 de Abril del año 2015 por Noé Yax utilizando software FE-Sizer V3.0	

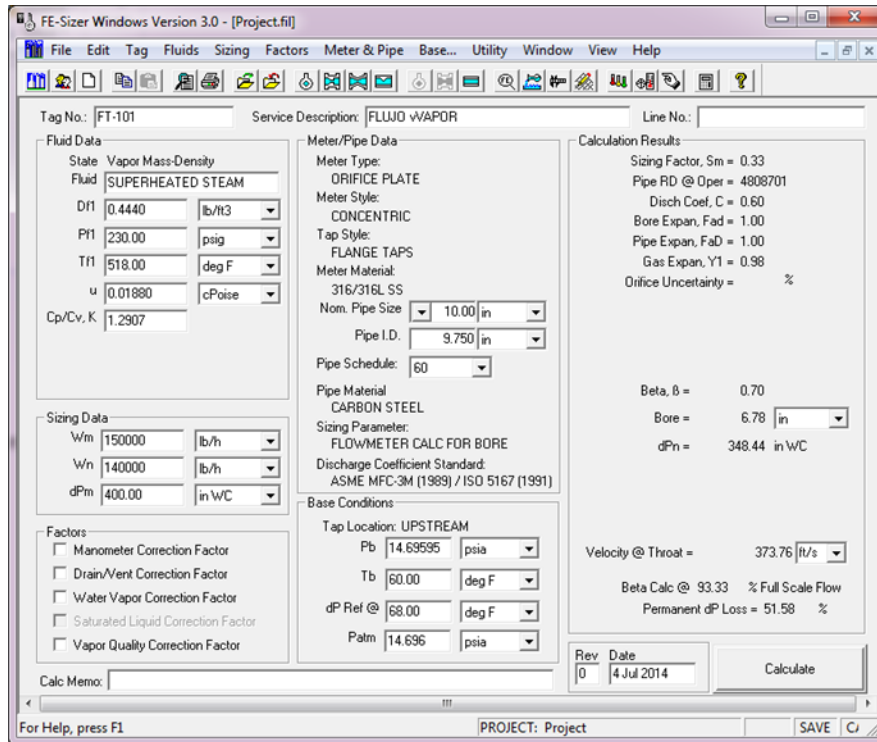
Fuente: elaboración propia, empleando FE-Sizer.

Figura 31. **Diseño e instalación de placa de orificio para medición de flujo de vapor sobrecalentado**



Fuente: elaboración propia, empleando FE-Sizer.

Figura 32. Software FE-Sizer para dimensionar placas de orificio



Fuente: elaboración propia, empleando FE-Sizer.

### 4.3.7.3. Termocoplas

Se realizará la medición de temperatura en los siguientes puntos:

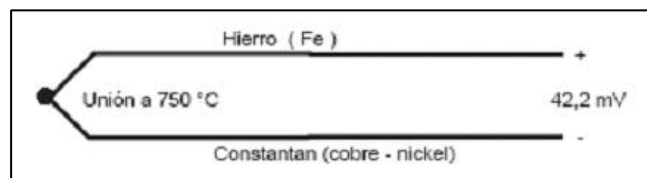
- Agua de alimentación
- Vapor producido
- Hogar de la caldera

Dichas mediciones se utilizan para determinar la eficiencia de la caldera, se selecciona este elemento de medición debido a los rangos de temperatura

altos que se generan en cada punto. Dichas variables solamente son de monitoreo, no influyen en el control de nivel del domo.

La termocopla es un transductor formado por la unión de dos metales distintos que produce una diferencia de potencial muy pequeña (del orden de los milivoltios), que está en función de la diferencia de temperatura entre uno de los extremos denominado punto caliente, o unión caliente o de medida, y el otro llamado punto frío, o unión fría o de referencia.

Figura 33. **Esquema de generación de señal de termocopla**



Fuente: *Esquema de generación de señal de termocopla.*

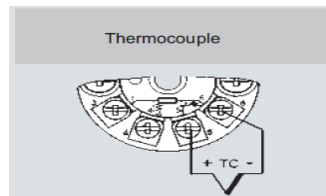
[http://serverdie.alc.upv.es/asignaturas/LSED/200304/0.Sens\\_Temp/Clasify/Termocuplas.htm](http://serverdie.alc.upv.es/asignaturas/LSED/200304/0.Sens_Temp/Clasify/Termocuplas.htm).

Consulta: Consulta: junio de 2015.

Para las mediciones de temperatura se utilizarán termocoplas tipo R, la cual es la unión de dos metales, platino y rodio, adecuados para la medición de temperaturas superiores a 1 300 °C.

Para llevar esta señal hasta el controlador se utilizará un transmisor de temperatura del fabricante Siemens, el cual tiene un esquema de conexión que se presenta a continuación.

Figura 34. **Conexión de transmisor para sensor de temperatura termocopla**



Fuente: Siemens. *Manual del fabricante. Siemens, measuring instruments for temperature* .  
p. 3/20.

#### **4.4. Elementos finales de control y válvulas automáticas**

Se presentan los elementos finales de control y la descripción de las válvulas automáticas.

##### **4.4.1. Válvulas encendido-apagado (*on/ff*)**

Se le llama válvula a un dispositivo mecánico con el cual se puede iniciar, detener o regular la circulación (paso) de líquidos o gases mediante una pieza móvil que abre, cierra u obstruye en forma parcial uno o más orificios o conductos.

Se conoce como válvulas *on-off* a aquellas válvulas automatizadas que regulan el paso del fluido en forma discreta. Es decir, la válvula se abre completamente para permitir el paso de un fluido (sin importar su caudal ni presión) o se cierra completamente para cortar su paso.



#### **4.4.2. Válvulas de control**

Es un elemento final de control, el cual es utilizado como medio de regulación o modulación del paso de un fluido por dicha válvula, implicando que esta esté abierta en un determinado porcentaje diferente a 0 o 100 % de su carrera. La válvula regula o modula su apertura para influir en el paso del fluido, su tipo de movimiento puede ser rotativo o lineal vertical.

##### **4.4.2.1. Válvulas tipo globo**

Es un tipo de válvula con movimiento lineal vertical, que sirve para regular la cantidad de flujo que pasa por ella, el elemento de cierre asienta sobre una sección circular. A medida que el elemento de cierre se aproxima al asiento, la sección de paso se reduce y, por lo tanto, aumenta la pérdida de carga disminuyendo el caudal.

- Coeficiente de caudal (CV): es el caudal (GPM) de agua a una temperatura de 60 °C que provoca una caída de presión de 1 PSI a través de la válvula, con una apertura al 100 %.
- Curva característica: es la relación que se da entre la apertura de la válvula y su coeficiente de caudal. La válvula seleccionada posee una curva característica de igual porcentaje debido a que el control implica una acción directamente proporcional, es decir, a mayor apertura mayor caudal y viceversa.
- Actuador: es un dispositivo capaz de transformar energía hidráulica, neumática o eléctrica en la activación de un proceso, con la finalidad de generar un efecto sobre un proceso automatizado. Este recibe la orden

de un regulador o controlador y, en función a ella, genera la orden para activar un elemento final de control como, por ejemplo, una válvula.

Las partes de una válvula de control de globo son:

- **Cuerpo:** es la parte a través de la cual transcurre el fluido.
- **Obturador:** es el elemento que hace que la sección de paso varíe, regulando el caudal y, por lo tanto, la pérdida de presión.
- **Accionamiento:** es la parte de la válvula que hace de motor para que el obturador se sitúe en una posición concreta. Puede ser motorizado, mecánico, neumático, manual o electromagnético.
- **Cierre:** une el cuerpo con el accionamiento. Hace que la cavidad del cuerpo y del obturador (donde hay fluido) sea estanco y no fugue.
- **Vástago:** es el eje que transmite la fuerza del accionamiento al obturador para que este último se posicione.

#### **4.4.2.2. Válvulas tipo bola**

Son de tipo rotativo, ofrecen muy buena capacidad de cierre y son prácticas porque para abrir y cerrar la válvula es tan sencillo como girar la manivela 90°. Se pueden hacer de paso completo, lo que significa que la apertura de la válvula es del mismo tamaño que el interior de las tuberías y esto resulta en una muy pequeña caída de presión. Otra característica principal, es la disminución del riesgo de fuga de la glándula sello, que resulta debido a que el eje de la válvula solo se tiene que girar 90°.

Cabe señalar que esta válvula es para uso exclusivo en la posición totalmente abierta o cerrada. No es adecuada para su uso en una posición de

apertura parcial para ningún propósito, como el control de caudal. Cuando se decide utilizar este diseño para una función de control, tiene un diseño especial.

La válvula de bola hace uso de un anillo suave conformado en el asiento de la válvula. Si la válvula se utiliza en posición parcialmente abierta, la presión se aplica a solo una parte del asiento de la válvula, lo cual puede causar que el asiento de la válvula se deforme. Si el asiento de la válvula se deforma, sus propiedades de sellado se vulneran y esta fugará como consecuencia de ello.

#### **4.4.2.3. Válvulas de mariposa**

Este tipo de válvula resulta como consecuencia de la búsqueda de regulación y un sello para grandes caudales. Esta válvula ocupa un espacio relativamente reducido en la tubería y se fabrican en una gran gama de materiales, entre ellos metales y termoplásticos.

El costo de estas válvulas es relativamente bajo, tomando como referencia las válvulas de regulación (globo, diafragma, tapón excéntrico y bola segmentada), una restricción especial a considerar son los sólidos suspendidos.

#### **4.4.3. Selección y dimensionamiento de la válvula a utilizar en el proceso**

Se realiza una descripción de la selección y dimensionamiento de la válvula.

#### 4.4.3.1. Válvula de globo

Para la aplicación de control de nivel del domo, el elemento final de control seleccionado es una válvula de control tipo globo, la cual tiene las siguientes características:

- Válvula de control tipo globo del fabricante Valtek de Flowserve, criterio de selección de fabricante.
- Curva característica igual porcentaje (EQ %) debido a la acción de respuesta, es decir, la apertura es directamente proporcional al flujo, a mayor apertura mayor caudal y viceversa.
- Conexión a proceso tipo brida 3" clase 300, está en función del cálculo del CV y de la presión de suministro de agua de alimentación para la caldera.
- Trim 2,0 con CV = 82, calculado por el fabricante, tomando como referencia los datos enviados de proceso.
- Cuerpo de acero al carbón, criterio tomado en función a factores de corrosión y ambiente de trabajo.
- Trim de acero inoxidable 316, criterio tomado debido a que estará en contacto constante con agua.
- Sello clase IV, debido a la posición de suministro, el sello no es una función primordial en este punto, por tal motivo se ha elegido una

clasificación de sello tipo IV pues permite hasta el 0,01 % del CV máximo.

- Actuador neumático para control, debido a que es una aplicación en medio de un ambiente que busca la limpieza, es necesario utilizar un actuador de tipo neumático.
- Posicionador inteligente Hart, ya que se realizará el control de procesos utilizando un PLC, este deberá llevar un protocolo de comunicación para su manipulación desde dicho controlador.
- Manómetros, es necesario monitorear las presiones que son suministradas al actuador, de esta depende su correcto funcionamiento.
- Filtro y regulador, debido a que se utiliza un actuador de tipo neumático y que el actuador tiene una presión de funcionamiento establecida por el fabricante, es necesario regular dicha presión y limpiar de condensados e impurezas el aire.

#### **4.4.3.2. Actuador**

Debido a que ya se cuenta con suministro de aire en la planta con una presión aceptable, se selecciona el actuador neumático que necesita una presión de suministro mínima de 60 PSIG.

#### **4.4.3.3. Posicionador**

Es básicamente un dispositivo que censa tanto la señal de un instrumento (controlador) como la posición del vástago de una válvula. Su función principal

es la de asegurar que la posición de este vástago corresponda a la señal de salida del controlador.

Dicho posicionador posee un protocolo de comunicación Hart, el cual recibe una señal de referencia de 4 a 20 mA, donde la señal funciona de la siguiente manera:

- 0 mA corresponde a una apertura del 0 %
- 20 mA corresponde a una apertura del 100 %

#### **4.5. Tipos de control**

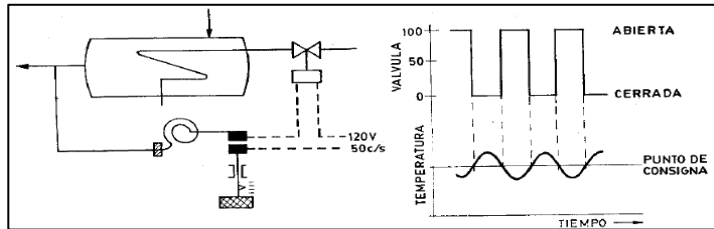
Se presentan los diferentes tipos de control, como el control todo o nada, control regulado, entre otros.

##### **4.5.1. Control todo nada (*on-off*)**

En la regulación todo-nada el elemento final de control se mueve rápidamente entre una de dos posiciones fijas a la otra, para un valor único de la variable controlada.

El control todo-nada funciona satisfactoriamente si el proceso tiene una velocidad de reacción lenta y posee un tiempo de retardo mínimo. Se caracteriza porque las dos posiciones extremas de la válvula permiten una entrada y salida de energía al proceso ligeramente superior e inferior respectivamente a las necesidades de la operación normal.

Figura 35. Control *on-off* para una válvula en función de la temperatura

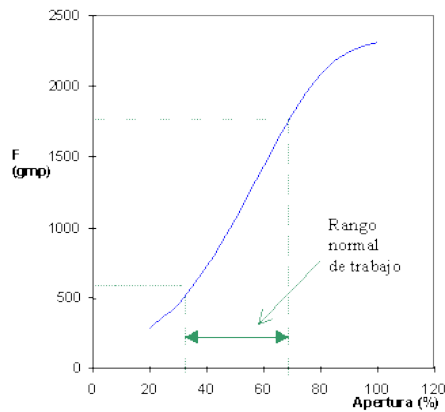


Fuente: CREUS, Antonio. *Instrumentación industrial*. p. 506.

#### 4.5.2. Control regulado

Es el tipo de control donde el elemento final de control o la válvula de control funciona en diversas posiciones. Tomando como referencia una señal análoga de la variable de proceso, es decir, tanto la variable de proceso como la variable manipulada, el flujo de agua de alimentación y la válvula de regulación de alimentación respectivamente, funcionan de manera análoga.

Figura 36. Control análogo flujo de agua *versus* apertura de la válvula



Fuente: *Control análogo flujo de agua versus apertura de la válvula*.

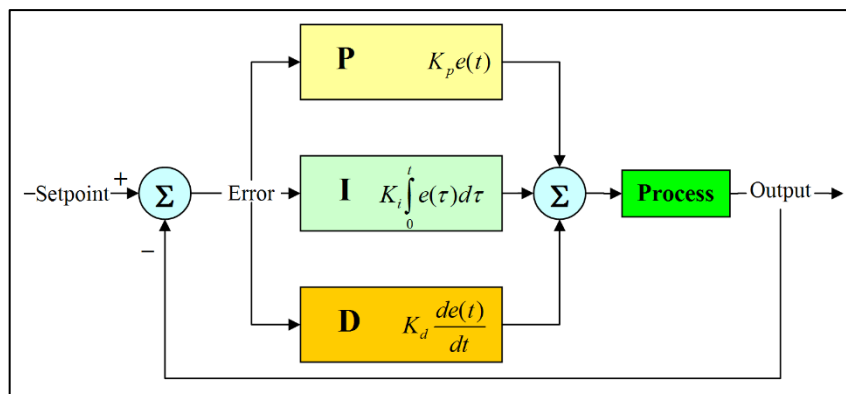
<http://www.edu.xunta.es/centros/cifpcoroso/es/node/635>. Consulta: junio de 2015.

### 4.5.3. Control PID

El control PID (proporcional, integral y derivativo) es un mecanismo de control que a través de un lazo de retroalimentación permite regular la velocidad, temperatura, presión y flujo, entre otras variables, de un proceso en general. El controlador PID calcula la diferencia entre la variable real contra la variable deseada. En el sistema de alimentación de agua de la caldera, regularmente interesa mantener el flujo de agua igual al flujo de vapor utilizando un algoritmo de control, por lo tanto, el control PID mide las diferencias que existen en el sistema y corrige dicho valor utilizando tres acciones diferentes: ganancia proporcional (P), integral (I) y derivativo (D).

En el sistema PID entra un error calculado a partir de la salida deseada, menos la salida obtenida y su salida es utilizada como entrada en el sistema que se quiere controlar. El controlador intenta minimizar el error ajustando la entrada del sistema.

Figura 37. Algoritmo de control PID



Fuente: *Algoritmo de control PID*. <http://www.forsdeelectronica.com/f11/control-proporcional-motor-dc-117854/>. Consulta: junio de 2015.

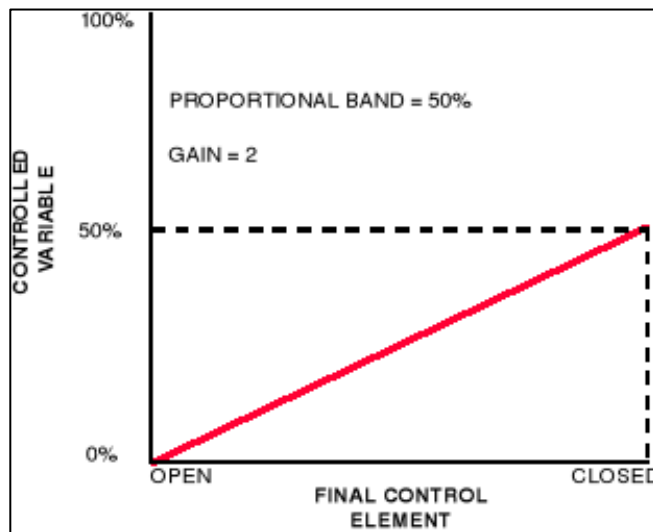


#### 4.5.3.1. Acción proporcional

La respuesta proporcional es la base de los tres modos de control. Si los otros dos, control integral y control derivativo están presentes, estos son sumados a la respuesta proporcional. El término proporcional significa que existe una relación lineal entre el valor de la variable controlada y la posición del elemento final de control. Esta relación es llamada ganancia del controlador. Para algunos controladores, la acción proporcional es ajustada por medio de tal ajuste de ganancia.

Para el control de flujo se puede utilizar una relación de flujo *versus* apertura de la válvula, estas dos en porcentajes, la acción proporcional para el algoritmo de control tendrá una tendencia como se presenta a continuación.

Figura 38. Control proporcional con ganancia igual a 2



Fuente: CREUS, Antonio. *Instrumentación industrial*. p. 508.

En la figura anterior, la válvula o elemento final de control se manipulará en un rango del 0 a 100 % de apertura. Esta apertura corresponderá a un rango de variable de proceso del 0 a 50 %, es decir, cuando la variable de proceso o variable controlada tenga un valor de 0 %, la válvula estará completamente abierta y cuando la variable de proceso o variable controlada esté a un 50 % de su rango, la válvula estará totalmente cerrada. Tal y como se aprecia en la gráfica, la tendencia de dicha acción proporcional es de tipo lineal.

La banda proporcional es el porcentaje del campo de medida de la variable que la válvula o elemento final de control necesita para efectuar una carrera completa, es decir, pasar de completamente abierta a completamente cerrada.

La ganancia es la relación entre la variación de la señal de salida del controlador a la válvula de control y la variación de la señal de entrada procedente del elemento primario o del transmisor.

#### **4.5.3.2. Acción integral**

La acción integral da una respuesta proporcional a la integral del error, esta acción elimina el error de operación provocado por la acción proporcional. Por otro lado, se obtiene un mayor tiempo de establecimiento, una respuesta más lenta y el periodo de oscilación es mayor que en el caso de la acción proporcional.

El control integral actúa cuando existe una desviación entre la variable de proceso y el punto de consigna. Dicho error es integrado en el tiempo y se suma a la acción proporcional, logrando así una regulación de lazo ligeramente estable.

El efecto de la acción integral da una salida del controlador que es proporcional al error acumulado, esto implica un modo de controlar lento.

Posteriormente, la respuesta integral es adicionada al modo proporcional para formar el control P + I, con el propósito de obtener una respuesta estable del sistema sin error estacionario.

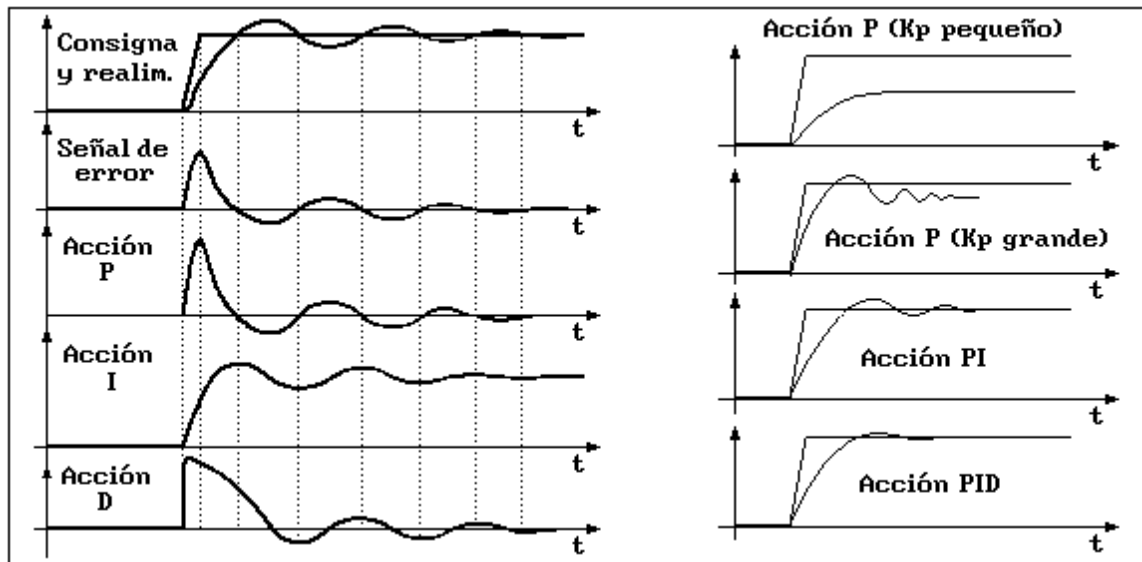
#### **4.5.3.3. Acción derivativa**

La acción derivativa da una respuesta proporcional a la derivada del error (velocidad de cambio del error), añadiendo esta acción de control a las anteriores, se disminuye el exceso de sobre oscilaciones. Existen diversos métodos de ajuste para controladores PID, pero ninguno de ellos garantiza que siempre encuentre un PID que haga estable el sistema. Por lo que el más usado sigue siendo el método de prueba y error, probando parámetros del PID y, en función de la salida obtenida, variando estos parámetros.

Esta acción tiene carácter de previsión, lo que hace más rápida la acción de control, aunque tiene la desventaja importante que amplifica las señales de ruido y puede provocar saturación en el actuador. La acción de control derivativa nunca se utiliza por sí sola, debido a que solo es eficaz durante periodos transitorios.

La función de la acción derivativa es mantener el error al mínimo corrigiéndolo proporcionalmente con la misma velocidad que se produce; de esta manera evita que el error se incremente.

Figura 39. **Funcionamiento control PID**



Fuente: *Funcionamiento control PID.*

<http://www.geocities.ws/jeesusmeeerino/procesos/teoriapid/teoriapid.html>

Consulta: junio de 2015.

#### 4.6. Seguridad de la caldera

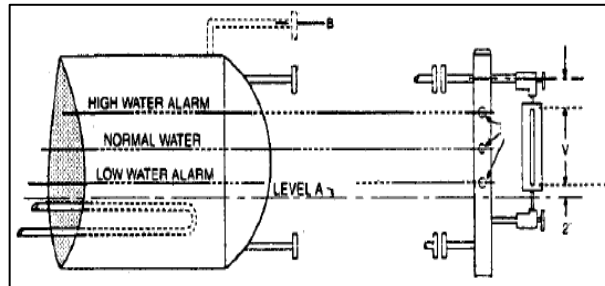
La finalidad de instalar un mecanismo de seguridad por nivel en la caldera es proteger la misma ante la ausencia o el aumento excesivo del nivel en el domo de la caldera.

Se implementará un mecanismo de seguridad en la caldera, el cual consta de accionamientos físicos y monitoreo en el sistema de control, para tal implementación se deben definir los cuatro niveles físicos de seguridad a tomar en cuenta en el domo.

- Nivel alto alto (LSHH): se refiere al nivel del domo por encima del nivel alto, es una condición indeseable por la cual la caldera debe detenerse. Esto provocaría arrastre de partículas de agua en el vapor producido, lo que provocaría daños a la turbina utilizada para cogeneración.
- Nivel alto (LSH): se refiere a un nivel por encima del centro del domo. Es una condición indeseable que no detiene la caldera, sin embargo, el operario deberá prestar atención e impedir que el nivel crezca al siguiente nivel (alto alto).
- Nivel bajo (LSL): se refiere a un nivel por debajo del centro del domo. Esta es una condición de alerta, pues indica que el nivel en el domo empieza a descender, este deberá ser corregido por el algoritmo de control del sistema y el operario deberá prestar atención para impedir que este descienda al siguiente nivel (bajo bajo).
- Nivel bajo bajo (LSLL): se refiere al nivel del domo en el valor mínimo permisible de operación. Esta es una condición indeseable bajo la cual la caldera debe detenerse, pues de continuar descendiendo el nivel, la probabilidad de explosión por sobrepresión aumenta.

Para conocer dichos niveles se utilizará una columna de agua, que es un dispositivo mecánico que posee en su interior cuatro electrodos, un electrodo para cada nivel deseado. Este dispositivo va acoplado directamente al domo de la caldera utilizando conexión con bridas.

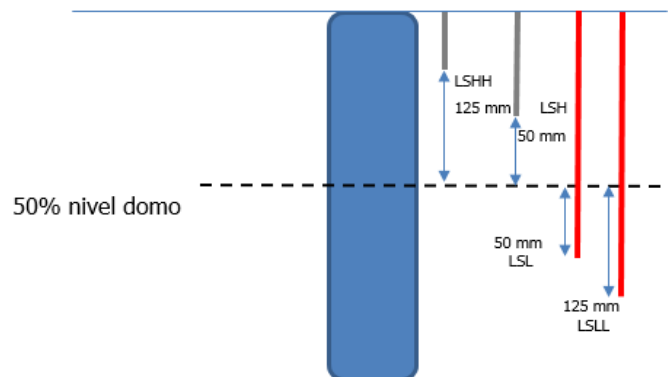
Figura 40. **Montaje de conexión entre el domo y la columna de agua**



Fuente: Clark-Reliance. *Manual del fabricante. Section Ab2.4b. p. 3/21.*

El principio de funcionamiento de dicha columna de agua con electrodos es por contacto directo con el agua, es decir, se dispone de 4 electrodos alojados verticalmente, a distancias separadas en función de las distancias definidas para cada nivel de seguridad. Estas distancias han sido definidas tomando como referencia la sección I de *ASME Boiler and Pressure Vessel Code 52.01-2*, el cual indica que el nivel mínimo para que la caldera opere debe de ser 2" arriba del último tubo inferior del domo.

Figura 41. **Distancia de electrodos para columna de agua de seguridad**



Fuente: elaboración propia, empleando FE-Sizer.

- Operación normal:
  - Los electrodos LSL y LSLL estarán sumergidos en el agua de la caldera.
  - Los electrodos LSH y LSHH estarán libres de contacto con el agua de la caldera.
  
- Operación con aumento de nivel:
  - El electrodo LSH es el primero en tener contacto con el agua, en este punto la caldera no se detiene, es una alarma que sugiere una acción correctiva, ya sea por el sistema o el operario.
  - El electrodo LSHH entra en contacto con el agua, en este punto la caldera deberá detenerse, siguiendo la secuencia de disparos.
  
- Operación con disminución de nivel:
  - El electrodo LSL deja de tener contacto con el agua debido a la disminución del nivel, la caldera no se detiene, sin embargo, esto genera una acción correctiva en el sistema o por el operario.
  - El electrodo LSLL deja de tener contacto con el agua, lo que indica que el nivel se encuentra 2 pulgadas por encima del tubo más bajo del domo y continua descendiendo, lo que indica ausencia de agua en el domo. Esta es la condición más crítica de operación de la caldera, por tal motivo deberá detenerse siguiendo la secuencia de disparo.

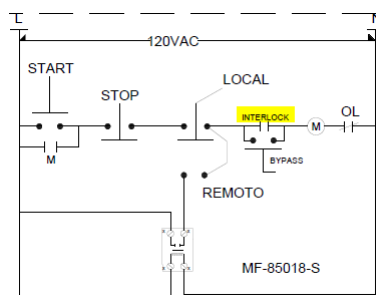
Los dispositivos que se utilizarán para detener la operación de la caldera son:

- Ventilador forzado
- Ventilador inducido bajo fuego
- Ventilador inducido sobre fuego
- Lanzadores de combustible
- Alimentadores de combustible

El modo de funcionamiento de seguridad de la caldera por nivel alto alto y nivel bajo bajo es detener la operación de la caldera apagando los dispositivos anteriormente listados.

Para que esto suceda se utilizará una lógica de disparo por enclavamiento eléctrico de bobina, es decir, cuando ocurra un estado de nivel bajo bajo o nivel alto alto, los contactos auxiliares de las bobinas que están directamente cableados a las alimentaciones de los dispositivos se abrirán, con esto se detiene el proceso por falta de combustión.

Figura 42. **Dispositivo *interlock* de disparo por nivel alto alto y nivel bajo bajo**



Fuente: elaboración propia, empleando FE-Sizer.



Los niveles de alarmas, sin que la caldera se detenga, son:

- Nivel alto
- Nivel bajo

Los niveles que detienen la caldera son:

- Nivel alto alto
- Nivel bajo bajo

Ante tales escenarios, se deberá corregir la causa de la falla para que la caldera inicie de nuevo su operación. Es importante hacer notar que los disparos ocurren físicamente, no los realiza el sistema, sin embargo, son permisivos para que el proceso de puesta en marcha se pueda realizar desde el sistema de control.

#### **4.7. Costos**

La implementación de dicha estrategia no solo permitirá mejorar el control para la producción de vapor, además se instalarán medidores de flujo de vapor, para los diferentes abastecimientos de vapor. Con lo que se obtendrá el consumo de vapor por unidad de proceso, con esto se logrará tener un mejor control de recursos consumidos y determinar los costos de operación.

Todos los costos presentados a continuación se basan solamente en consumo de combustible. Para realizar dichos cálculos, es necesario conocer datos característicos de la caldera.

- Eficiencia de caldera: 41 %, dicha eficiencia se obtuvo con estudios previos, en los cuales se concluyó la baja eficiencia debido a que no existe un precalentamiento de agua de alimentación, entre otros factores como la pérdida de calor debido al deterioro del aislamiento en tuberías.
- Costo combustible: 14,85 \$/tonelada, este costo incluye un compuesto de materiales utilizados como combustible, dentro de los cuales están:
  - Madera *chip*
  - Casulla de arroz
  - Bagazo de caña
- Poder calorífico combustible: 15 000 BTU/Lb, poder calorífico determinado por entidad privada, la cual concluye dicha obtención debido a la mezcla de diferentes materiales de combustible.
- Entalpía de vapor a 230 PSI y 518 °F= 1275,92 BTU/Lb
- Entalpía de agua de alimentación a 300 PSI y 248 °F= 217,126 BTU/Lb

Los cálculos utilizados para determinar los costos de producción basándose en consumo de combustible son:

- Energía consumida = consumo combustible \* poder calorífico combustible

$$= 24\ 102\ \text{Lb/h} * 15\ 000\ \text{BTU/Lb} = 361\ 539,45 \times 10^3\ \text{BTU/h}$$

- Energía utilizada para producir vapor= eficiencia \* energía consumida

$$= 0,41 * 361\,539,45 \times 10^3 \text{ BTU/h}$$

$$= 148\,231,1745 \times 10^3 \text{ BTU/h}$$

- Producción de vapor =  $(1/\Delta h)$  (energía utilizada para producir vapor)
 
$$= (1 \text{ Lb}/1\,058,794 \text{ BTU}) * (148\,231,1745 \times 10^3 \text{ BTU/h})$$

$$= 140\,000,0137 \text{ Lb/h}$$
- Costo 1 000 Lb de vapor = precio combustible \*  $(1/\text{poder calorífico combustible})$  \* (energía utilizada para producir vapor/producción de vapor) \* 1 000
 
$$= (0,006735855 \text{ \$/Lb}) * (\text{Lb}/15\,000 \text{ BTU})$$

$$(148\,231,1745 \times 10^3 \text{ BTU/h} / 140\,000,0137 \text{ Lb/h}) * 1\,000 \text{ Lb de vapor}$$

$$= 0,475458836 \text{ \$/ 1000 Lb vapor}$$

$$= 0,000475459 \text{ \$/ Lb}$$
- El periodo de operación de la planta es de 75 % del tiempo anual, esto es aproximadamente 274 días, con lo que se obtiene:

Combustible consumido =	24 102,63	Lb/h
	10,93	Ton/h
	262,39	Ton/día
	71 828,37	Ton/año

Dado que el costo por tonelada de combustible es de 14,85 \$/tonelada y se utilizan al año 71 828,37 toneladas, esto representa un gasto anual de:  
1 066 651,31 \$/año.

Actualmente el precio de la libra de vapor es de 0,05 \$/Lb.

- Los consumos de vapor actuales en la planta por sección son:

Tinturado	8 590 Lb/hora
Limpieza tinturado #1	5 900 Lb/hora
Limpieza tinturado #2	5 900 Lb/hora
Limpieza tinturado #3	5 900 Lb/hora
Compresores Turbo Flow	9 110 Lb/hora
Planchado	725 Lb/hora
Gluer de sellado	524 Lb/hora
Otros	800 Lb/hora
Consumo total para procesos:	37 449 Lb/hora

- Durante un periodo de producción de aproximadamente 274 días, los ingresos por venta de vapor para procesos es de:

$$37,449 \text{ Lb/hora} * 0.05 \text{ \$/Lb} = 1\,872,45 \text{ \$/hora} * (24 \text{ horas} * 274 \text{ días}) = 12\,313\,231,12 \text{ \$/año.}$$



## CONCLUSIONES

1. La implementación de la filosofía de control de tres elementos para el nivel del domo resulta en una estrategia, mediante la cual se reducen las oscilaciones ante cambios bruscos de demanda y se mejora la eficiencia del proceso mediante el uso de recursos.
2. Por medio de cálculos y ensayos se pueden establecer parámetros propios del sistema, como proporcional, integral y derivativo, para que los lazos de control funcionen de la forma más fina posible.
3. Mediante el control de nivel del domo de la caldera es posible aprovechar las mediciones con la finalidad de tener registros que permitan realizar cálculos de costos.
4. Al implementar la estrategia de control de nivel del domo, es necesario también contar con un sistema de seguridad, el cual deberá actuar de manera física y directa en los equipos que intervienen en el proceso.



## RECOMENDACIONES

1. Seleccionar los instrumentos y elementos finales de control basándose en características operacionales, como presión, temperatura, ambiente, entre otros, pues, en gran parte, de estos depende que la estrategia de control funcione adecuadamente.
2. Los instrumentos y elementos finales de control deberán ser instalados y parametrizados por personal calificado, asegurando así la funcionalidad segura y correcta del proceso.
3. Establecer valores límites de operación en el sistema de control, pues se debe prevenir entrar en la zona de peligro, para la cual también se cuenta con un sistema de seguridad.
4. Una vez establecidos los parámetros de operación, ningún operario deberá manipular dichos valores y, como variable primordial, no deberá ser alterado el punto de consigna del nivel del domo, esto solo lo podrá realizar el ingeniero de procesos, bajo criterios operacionales.
5. Como no se cuenta con una computadora almacenadora de datos, es necesario extraer los datos históricos de operación semanalmente, pues la memoria reiniciará cada semana.





## BIBLIOGRAFÍA

1. ACEDO SÁNCHEZ, José. *Instrumentación y control avanzado de procesos*. 7a ed. España: Ediciones Díaz Santos, 2006. 603 p.
2. American National Standard *ANSI/ISA-5.1*. 9a ed. EUA: Research Triangle Park, 2009. 99 p.
3. KITTO, J.B.; STULTZ, S.C. *Steam its generation and use*. 41a ed. EUA. The Babcock & Wilcox Company, 2005. 1018 p.
4. SEVERNS, E.H.; DEGLER, H.E.; MILES, J.C. *La producción de energía mediante el vapor de agua, aire y gases*. 8a ed. México: Reverté, 1975. 105 p.
5. SMITH, L. Cecil. *Practical process control tuning and troubleshooting*. 10a ed. EUA: John Wiley & Sons, Inc, 2009. 428 p.
6. YUNUS, Michael. *Termodinámica*. 6a ed. México: McGraw-Hill, 2009. 1 007 p.

