



**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL  
FACULTAD DE EDUCACION TECNICA PARA EL  
DESARROLLO  
CARRERA DE INGENIERIA ELECTRICO-MECANICA**

**TEMA:**

**"Análisis de Calderas para Generación de Energía  
Eléctrica"**

**AUTOR:**

**Velásquez Cedeño Ángel Martin**

**PREVIA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE:**

**Ingeniero en Eléctrico–Mecánica**

**TUTOR:**

**Ing. Jaime Layana Chancay**

**Guayaquil, Ecuador**

**2014**



**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL  
FACULTAD DE EDUCACION TECNICA PARA EL DESARROLLO  
CERTIFICACIÓN**

Certificamos que el presente trabajo fue realizado en su totalidad por Ángel Martín Velásquez Cedeño, como requerimiento parcial para la obtención del Título de Ingeniero en Eléctrico–Mecánica.

**TUTOR**

---

**Ing. Jaime Layana Chancay**

**REVISORES**

---

**Ing. Eduardo Zambrano Robayo**

---

**Ing. Eduardo Mestanza Cedeño**

**DIRECTOR DE LA CARRERA**

---

**Ing. Armando Heras Sánchez**

**Guayaquil, a los 29 del mes de Abril del año 2014**



**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL  
FACULTAD DE EDUCACION TECNICA PARA EL DESARROLLO  
CARRERA DE INGENIERIA ELECTRICO-MECANICA**

**DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD**

Yo, Ángel Martin Velásquez Cedeño

**DECLARO QUE:**

El Trabajo de Titulación "Análisis de Calderas para Generación de Energía Eléctrica" previa a la obtención del Título de "Ingeniero en Eléctrico–Mecánica", ha sido desarrollado en base a una investigación exhaustiva, respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan al pie de las páginas correspondientes, cuyas fuentes se incorporan en la bibliografía. Consecuentemente este trabajo es de mi total autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance científico del Trabajo de Titulación referido.

**Guayaquil, a los 29 del mes de Abril del año 2014**

**EL AUTOR**

---

**Ángel Martin Velásquez Cedeño**



**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL  
FACULTAD DE EDUCACION TECNICA PARA EL DESARROLLO**

**AUTORIZACIÓN**

Yo, Ángel Martín Velásquez Cedeño

Autorizo a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, la publicación en la biblioteca de la institución del Trabajo de Titulación: "Análisis de Calderas para Generación de Energía Eléctrica", cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

**Guayaquil, a los 29 del mes de Abril del año 2014**

**EL AUTOR:**

---

**Ángel Martín Velásquez Cedeño**

## **AGRADECIMIENTO**

Quiero dar las gracias sinceramente a todas aquellas personas que me han apoyado profesionalmente en la realización de este trabajo. En especial a:

### **A Dios:**

Por haberme dado la suficiente fuerza y salud para terminar esta carrera universitaria.

### **A mi madre Mariana Cedeño:**

Por sus consejos, valores y por todo el cariño y esfuerzo que me regalo desde que me tuvo.

### **A mi esposa y mis hijos:**

Por su compañía, motivación y comprensión durante toda mi carrera.

### **A mis profesores de la escuela de Ingeniería Electrico-Mecanica:**

Por compartir sus conocimientos y experiencias profesionales.

### **A la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil:**

Por abrirme sus puertas y brindarme una carrera universitaria.

### **A la Facultad de Ingeniería Electrico-Mecanica:**

Por darnos una formación profesional.

### **Al Ing. Jaime Layana Chancay:**

Por haber aceptado apoyarme, con su experiencia, asesorando este trabajo.

### **A mis amigos y compañeros de trabajo:**

Que me han motivado y apoyado a terminar esta carrera.

**Ángel Martin Velásquez Cedeño**

## **DEDICATORIA**

Dedico este trabajo a todas las personas que a lo largo de mi vida me han apoyado y motivado en mi formación personal y académica. En especial a:

**Dios:**

Por haberme permitido finalizar la carrera universitaria.

**Mis padres:**

Porque este logro también es de ellos.

**Mi esposa:**

Porque ella me ha acompañado y dedicado parte de su vida.

**Mis hijos:**

Porque ellos representan para mí, una gran motivación.

**Mis hermanos:**

Que compartieron y compartirán muchas tristezas y alegrías conmigo.

**Profesores que tuve en la facultad:**

Por sus enseñanzas y por compartir sus conocimientos y experiencias.

**A mis amigos y compañeros de trabajo:**

Porque me han motivado y creyeron en mí.

**A mis compañeros de estudio:**

Que nos apoyamos mutuamente en nuestra formación profesional a lo largo de toda la carrera universitaria.

**Ángel Martín Velásquez Cedeño**

# TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

---

**Ing. Jaime Layana Chancay**

PROFESOR GUÍA Ó TUTOR

---

**Ing. Eduardo Zambrano Robayo**

PROFESOR DELEGADO

---

**Ing. Eduardo Mestanza Cedeño**

PROFESOR DELEGADO

---

**Eco. Gladys Contreras Molina**

PROFESOR DELEGADO

---

**Ing. Armando Heras Sánchez**

DIRECTOR DE LA CARRERA



**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL  
FACULTAD DE EDUCACION TECNICA PARA EL  
DESARROLLO  
CARRERA DE INGENIERIA ELECTRICO-MECANICA**

**CALIFICACIÓN**

---

**Ing. Jaime Layana Chancay**

**PROFESOR GUÍA Ó TUTOR**



## INDICE DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN .....	- 1 -
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	- 3 -
OBJETIVOS GENERALES.....	- 3 -
OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	- 3 -
HIPÓTESIS .....	- 4 -
JUSTIFICACIÓN .....	- 4 -
METODOLOGÍA.....	- 5 -
CAPITULO 1 .....	- 6 -
CONCEPTOS FUNDAMENTALES SOBRE ENERGÍA Y CALOR.....	- 6 -
1.1 Energía: .....	- 6 -
1.2 Combustibles fósiles .....	- 7 -
1.3 Combustión y Combustibles: .....	- 8 -
1.4 Combustión: .....	- 8 -
1.5 Clasificación del combustible.....	- 9 -
1.6 Concepto de energía: .....	- 9 -
1.7 Las propiedades de la energía.....	- 9 -
1.8 Transformación de la energía .....	- 9 -
1.9 Proceso térmico para generación de energía eléctrica .....	- 10 -
1.10 Leyes que gobiernan la energía .....	- 11 -
1.11 Calor .....	- 12 -
1.12 Transferencia de calor: .....	- 12 -
CAPITULO 2 .....	- 14 -
FUNDAMENTOS SOBRE LA GENERACIÓN DE VAPOR .....	- 14 -
2.1 Ciclo Rankine .....	- 14 -
2.2 Modificaciones para mejorar el rendimiento de un Ciclo Rankine.....	- 15 -
2.2.1 Ciclo Rankine con Sobrecalentamiento .....	- 15 -
2.2.2 Ciclo Rankine con Recalentamiento.....	- 16 -
2.2.3 Ciclo Rankine Regenerativo .....	- 17 -
2.2.3.1 Ciclo Rankine con calentadores abiertos .....	- 17 -
2.2.3.2 Ciclo Rankine con calentadores cerrado.....	- 17 -
2.3 El proceso del ciclo:.....	- 18 -
2.4 Efectos de la presión y la temperatura en el ciclo Rankine: .....	- 19 -
2.5 Mejoras del rendimiento de un ciclo de potencia: .....	- 19 -

2.6 Fundamentos termodinámicos del vapor:.....	- 20 -
2.6.1 Vapor.....	- 20 -
2.6.2 Tipos de vapor.....	- 20 -
2.7 Procesos termodinámicos.....	- 20 -
2.8 Conceptos termodinámicos .....	- 21 -
2.9 Conceptos básicos de fluidos .....	- 22 -
<b>CAPITULO 3 .....</b>	<b>- 23 -</b>
<b>DESCRIPCIÓN Y SISTEMAS DE CALDERAS .....</b>	<b>- 23 -</b>
3.1 Generalidades .....	- 23 -
3.2 Elementos de funcionamiento de una caldera .....	- 23 -
3.3 Descripción de un generador de vapor.....	- 26 -
3.4 Partes principales de un generador de vapor .....	- 27 -
3.5 Descripción general de los equipos de un generador de vapor .....	- 27 -
3.5.1 Domo o tambor de vapor:.....	- 27 -
3.5.2 Paredes de agua.....	- 28 -
3.5.3 Tambor de lodos .....	- 30 -
3.5.4 Equipos recuperadores de calor: .....	- 30 -
3.5.4.1 Economizador .....	- 30 -
3.5.4.2 Sobrecalentador.....	- 31 -
3.5.4.3 Recalentador .....	- 32 -
3.5.6 Atemperadores .....	- 32 -
3.5.7 Hogar de la caldera .....	- 32 -
3.5.8 Cenicero .....	- 32 -
3.5.9 Puerta del cenicero .....	- 33 -
3.5.10 Aislamiento y Refractario.....	- 33 -
3.5.11 Baffles y conductos de gases.....	- 33 -
3.5.12 Tapas de registro o puertas de inspección .....	- 34 -
3.5.13 Quemadores.....	- 34 -
3.5.14 Caja de aire.....	- 36 -
3.5.15 Ventiladores .....	- 37 -
3.5.16 Calentador de aire por vapor .....	- 37 -
3.5.17 Calentador de aire regenerativo .....	- 39 -
3.5.18 Bomba de agua de alimentación a la caldera .....	- 40 -
3.5.19 Equipo de tiro.....	- 40 -

3.5.20 Chimenea .....	- 41 -
3.5.21 Ventilador de aire de sellos.....	- 41 -
3.5.22 Ventilador para detectores de flama .....	- 41 -
3.5.23 Ventilador recirculador de gases .....	- 41 -
3.5.24 Calentadores de combustible .....	- 41 -
3.6 Clasificación de calderas acuotubulares para centrales térmicas .....	- 42 -
3.7 Calderas acuotubulares.....	- 42 -
3.8 Características de la Caldera de Tubos de Agua .....	- 44 -
3.9 Generador de vapor con circulación natural. ....	- 44 -
3.10 Generador de vapor con circulación forzada.....	- 45 -
3.14 Circuito Agua-Vapor.....	- 46 -
3.15 Sistemas de Calderas .....	- 48 -
3.15.1 Sistema de combustible .....	- 48 -
3.15.2 Sistema de aire de combustión.....	- 49 -
3.15.3 Sistema de tratamiento de agua.....	- 50 -
3.15.4 Sistema de precalentamiento de agua alimentación a la caldera .....	- 50 -
3.15.5 Sistema de gases de combustión .....	- 50 -
3.15.6 Sistema de sopladores mecánicos de hollín .....	- 51 -
<b>CAPITULO 4</b> .....	- 54 -
<b>SEGURIDAD EN CALDERAS</b> .....	- 54 -
4.1 Introducción.....	- 54 -
4.2 Desarrollo de los Estándares de Seguridad.....	- 54 -
4.3 Los sistemas de Seguridad .....	- 54 -
4.4 BMS para calderas industriales (Burner Management System). ....	- 55 -
4.5 Requerimientos funcionales .....	- 55 -
4.5.1 Disparos de Caldera. ....	- 56 -
4.5.2 Barrido o Purga de Caldera. ....	- 56 -
4.5.3 Rearme de Caldera.....	- 56 -
4.5.4 Encendido y apagado de los quemadores e ignitores. ....	- 56 -
4.5.5 Barrido de caldera.....	- 56 -
4.5.6 Secuencia automática .....	- 57 -
4.5.7 Rearme.....	- 57 -
4.5.8 Disparos de caldera.....	- 57 -
4.5.9 Detector de Llama.....	- 58 -

4.6 Seguridad en el combustible.....	- 58 -
4.7 Válvulas de seguridad .....	- 58 -
4.8 Construcción de la válvula de seguridad.....	- 59 -
4.9 Expansiones y dilataciones en caldera.....	- 60 -
4.10 Vigilancia .....	- 61 -
4.11 Formación del trabajador .....	- 61 -
4.12 Procedimientos contra accidentes.....	- 61 -
<b>CAPITULO 5 .....</b>	<b>- 63 -</b>
<b>FUNDAMENTOS DE CONTROL EN CALDERAS .....</b>	<b>- 63 -</b>
5.1 Sistema de control .....	- 63 -
5.2 Conceptos y definiciones. ....	- 64 -
5.3 Modos de control.....	- 64 -
5.3.1 Modo de control de dos posiciones (si – no).....	- 65 -
5.3.2 Modo de control proporcional: P.....	- 65 -
5.3.3 Modo de control integral: I.....	- 65 -
5.3.4 Modo de control proporcional más integral: PI.....	- 65 -
5.3.5 Modo de control derivativo D.....	- 66 -
5.3.6 Modo de control proporcional más derivativo PD.....	- 66 -
5.4 Operaciones básicas.....	- 66 -
5.5 Simbología.....	- 67 -
5.6 Elaboración de un diagrama de control.....	- 69 -
5.7 Válvulas de control (Elemento final de control) .....	- 69 -
5.8 Control de calderas .....	- 70 -
5.9 Variables a controlar en una caldera .....	- 72 -
5.9.1 Variables a regular .....	- 72 -
5.9.2 Variable perturbadora.....	- 72 -
5.9.3 Variables de regulación.....	- 72 -
5.10 Controles básicos de calderas .....	- 73 -
5.11 Control de nivel.....	- 74 -
5.11.1 Control de nivel de un elemento .....	- 74 -
5.11.2 Control nivel de dos elementos .....	- 76 -
5.11.3 Control de tres elementos .....	- 77 -
5.12 Control de combustión .....	- 81 -
5.13 Combustión y control de carga .....	- 82 -

5.14 Control de combustión .....	- 82 -
5.15 Control de combustión en calderas de recuperación .....	- 83 -
5.16 Control en cascada .....	- 84 -
5.16.1 Control de sobrecalentamiento .....	- 85 -
5.17 Control de presión del fuel oil.....	- 85 -
5.18 Control de temperatura del fuel oil .....	- 86 -
5.19 Control de presión del vapor de atomización.....	- 88 -
<b>CAPITULO 6 .....</b>	<b>- 91 -</b>
<b>OPERACIÓN DEL GENERADOR DE VAPOR EN PLANTAS</b>	
<b>TERMOELÉCTRICAS .....</b>	<b>- 91 -</b>
6.1 Descripción del proceso de las centrales termoeléctricas convencionales....	- 91 -
6.1.1 Generador de vapor .....	- 91 -
6.1.2 Turbina de vapor .....	- 91 -
6.1.3 Sistema de condensado .....	- 92 -
6.1.4 Sistema de agua de alimentación .....	- 92 -
6.2 Procedimientos de operación normal .....	- 93 -
6.3 Puesta en marcha del generador de vapor.....	- 93 -
6.3.1 Proceso de arranque.....	- 93 -
6.3.2 Rodado de turbina .....	- 94 -
6.3.3 Sincronización de la unidad .....	- 94 -
6.3.4 Toma de carga de la Unidad .....	- 95 -
6.4 Procedimientos de parada .....	- 95 -
6.5 Descripción del equipo para generación de electricidad.....	- 96 -
6.5.1 Turbogenerador eléctrico .....	- 96 -
6.5.2 Turbina de vapor .....	- 97 -
6.5.3 Principio de operación de la turbina.....	- 97 -
6.5.4 Partes principales de la turbina .....	- 97 -
6.5.5 Sistema auxiliar de la turbina.....	- 98 -
6.5.6 Sistema de lubricación y control .....	- 99 -
6.6 Generador eléctrico .....	- 99 -
6.7 Descripción básica del generador síncrono. ....	- 99 -
6.8 Partes principales del generador síncrono .....	- 100 -
6.9 Sistema de excitación del generador .....	- 102 -
6.10 Regulador automático de voltaje (AVR).....	- 102 -

6.11 Sistema de enfriamiento del generador .....	- 102 -
6.12 Sistema de protecciones del generador .....	- 103 -
<b>CAPITULO 7 .....</b>	<b>- 106 -</b>
<b>TRATAMIENTO DE AGUA PARA CALDERAS .....</b>	<b>- 106 -</b>
7.1 Tratamiento de Agua para Generación de Vapor .....	- 106 -
7.2 Tratamiento externo del agua .....	- 106 -
7.3 Tratamiento interno del agua .....	- 106 -
7.4 Parámetros Tratamiento de Agua.....	- 107 -
7.5 Incrustaciones .....	- 108 -
7.6 Corrosión y sus Efectos .....	- 108 -
<b>CAPÍTULO 8 .....</b>	<b>- 110 -</b>
<b>EFICIENCIA E IMPACTO AMBIENTAL EN CALDERAS .....</b>	<b>- 110 -</b>
8.1 Eficiencia .....	- 110 -
8.2 El problema energético.....	- 110 -
8.3 Balance de masa .....	- 111 -
8.4 Balance de energía.....	- 111 -
8.5 Fundamentos de la combustión .....	- 112 -
8.6 Método para calcular la eficiencia de caldera .....	- 113 -
8.6.1 Método directo .....	- 113 -
8.6.2 Método indirecto .....	- 113 -
8.7 Conceptos importantes.....	- 113 -
8.8 Análisis de la eficiencia en calderas .....	- 114 -
8.9 Pérdidas de calor principales. ....	- 114 -
8.9.1 Pérdida de calor asociada al exceso de aire.....	- 115 -
8.9.2 Pérdida de calor asociada a la temperatura de los productos de la combustión .....	- 116 -
8.9.3 Pérdida de calor en la purga .....	- 117 -
8.9.4 Pérdidas de calor debido a no contar con un sistema de precalentamiento del aire requerido para la combustión .....	- 117 -
8.9.5 Pérdidas de calor asociadas al uso de vapor en vez de aire comprimido para la atomización de combustible .....	- 117 -
8.9.6 Pérdidas de calor asociadas a la operación dinámica, puntos de máxima eficiencia y pérdidas de calor por radiación: .....	- 118 -
8.10 Comentarios.....	- 118 -
8.11 Medidas para la mejora de la eficiencia energética .....	- 118 -

8.12 Protección del medio ambiente.....	- 119 -
8.13 Energía y medio ambiente .....	- 120 -
8.14 Impacto ambiental de las centrales térmicas .....	- 120 -
8.15 Desarrollo sostenible .....	- 120 -
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	- 121 -
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	- 122 -
GENERALES .....	- 122 -
REFERENCIAS TESIS DE GRADO .....	- 124 -
INFORMES O ESTUDIOS SERIADOS.....	- 124 -

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 5.1	Símbolos para diagramas de control.	68
Tabla 5.2	Sistema de control de nivel	74
Tabla 6.7	Dispositivos de protección para el generador	104
Tabla 8.1:	Datos referenciales de aire en exceso según la clase de combustible y quemador.	114
Tabla 8.2	Puntos de rocío ácido, temperaturas mínimas recomendadas para los productos de la combustión y temperaturas admisibles del agua alimentación para prevenir corrosión en recuperadores de calor, de acuerdo al tipo de combustible.	115



# ÍNDICE DE GRÁFICOS

Figura 1.1 Fuentes de energía.	6
Figura 1.2 Energías primarias y finales.	7
Figura 1.3 Triangulo de la combustión.	8
Figura 1.4 Cuadro de energías utilizadas para generar electricidad.	10
Figura 1.5 Proceso de la Energía en una Central Térmica.	11
Figura 1.6 Esquema de los mecanismos de transferencia de calor.	13
Figura 2.1 Ciclo de Rankine simple.	14
Fig. 2.2 Diagrama del ciclo Rankine simple con sobrecalentamiento.	16
Fig. 2.3 El ciclo Rankine con recalentamiento.	16
Figura 2.4 Ciclo regenerativo de vapor con calentador abierto.	17
Figura 2.5 Ciclo regenerativo de vapor con calentador cerrado.	18
Figura 2.6 Proceso completo de un ciclo de potencia para generación eléctrica.	19
Figura 3.1 Caldera acuotubular.	23
Figura 3.2 Diagrama básico de una caldera	24
Figura 3.3 Caldera con economizador	25
Figura 3.4 Caldera con precalentador de aire	25
Figura 3.5 Descripción completa de un generador de vapor	27
Figura 3.6.1 Partes internas de un domo o calderín	28
Figura 3.6.2 Diagrama de flujos del domo o calderín	28
Figura 3.7.1 Disposición de las paredes de agua de una caldera acuotubular	29
Figura 3.7.2 Paredes de agua de una caldera acuotubular	30
Figura 3.8 El Economizador	31
Figura 3.9 El Sobrecalentador	31
Figura 3.10 Cenicero	33
Figura 3.11.1 Presentación interior de un quemador de una caldera acuotubular.	35
Figura 3.11.2 Presentación exterior de un quemador de una caldera acuotubular.	35

Figura 3.12.1 Esquema de una caja de aire y registros	36
Figura 3.12.2 Vista de caja de aire y registros	36
Figura 3.13 Ventilador de tiro forzado.	37
Figura 3.14.1 Esquema del calentador aire por vapor.	38
Figura 3.14.2 Calentador aire por vapor	38
Figura 3.15.1 Esquema de calentador aire regenerativo	39
Figura 3.15.2 Calentador aire regenerativo (car).	39
Figura 3.16 Esquema de bomba de alimentación de calderas. Centrifugas multietapa.	40
Figura 3.17 Vista de una caldera acuotubular	43
Figura 3.18 Esquema de una caldera acuotubular	44
Figura 3.19 Esquema de la circulacion del agua en forma natural.	45
Figura 3.20 Esquema de la circulacion del agua con bomba.	46
Figura 3.21 Circuito de circulación agua-vapor.	47
Figura 3.22 Sistema de combustible	49
Figura 3.23 Sistema de aire de combustión	50
Figura 3.24 Recorrido de los gases en una caldera	51
Figura 3.25 Soplador retráctil.	52
Figura 3.26 Soplador de pared.	53
Figura 4.1 Objetivos del sistema de seguridad.	55
Figura 4.2 Válvula de seguridad.	59
Figura 4.3 Válvula de seguridad para vapor sobrecalentado.	60
Figura 5.1 Lazo de control	63
Figura 5.2 Elementos y variables involucradas en un proceso controlado.	64
Figura 5.3 Operaciones básicas (Diagrama de bloques)	67
Figura 5.4 Diagrama de control básico	69
Figura 5.5 Válvula de control representativa	70
Figura 5.6 Esquema general del control de una caldera	71
Figura 5.7 Simulación de controles en una caldera	73
Figura 5.8 Control de nivel modulante de un elemento.	74
Figura 5.9 Control de nivel del domo de un elemento	75
Figura 5.10 Control modulante de dos elementos	76

Figura 5.11 Control de nivel del domo de dos elementos.	77
Figura 5.12 Registro y control de nivel modulante de tres elementos	78
Figura 5.13 Registro y control de nivel del calderin de tres elementos.	79
Figura 5.14 Registro y control de nivel del domo de tres elementos con dos valvulas de control	80
Figura 5.15 Variaciones de presión en el consumo de vapor.	81
Figura 5.16 Diagrama de bloques de control de combustion	84
Figura 5.17 Regulación de presión al fuel oil.	85
Figura 5.18 Esquema de regulación de presión al fuel oil.	86
Figura 5.19 Regulación de temperatura al fuel oil	86
Figura 5.20 Esquema de regulación de temperatura al fuel oil.	87
Figura 5.21. Control en cascada de temperatura del fuel oil.	88
Figura 5.22 Regulación de presión del fluido de gas atomizado	89
Figura 5.23 Regulación de presión del gas atomizado con consigna variable	90
Figura 6.1 Turbogenerador eléctrico	97
Figura 6.2 Tobera	97
Figura 6.3 Esquema básico de un generador síncrono.	100
Figura 6.4 Estator	100
Figura 6.5 Rotor.	101
Figura 6.6 Carcaza	101
Figura 6.7 Protecciones típicas de generador- transformador	104
Figura 7.1 Corrosión por oxígeno.	107
Figura 8.1 Esquema resumen del problema energético.	109
Figura 8.2 Esquema de corrientes para el balance de energía	110
Figura 8.3 Combustión completa y estequiométrica	111

## INTRODUCCIÓN

La producción de vapor utilizada para generar energía eléctrica es una alternativa básica en nuestro país, puesto que no podemos depender totalmente de los recursos hidroeléctricos. Es necesario hacer un análisis sobre la eficiencia de calderas para mejorar su combustión y por tanto minimizar el impacto.

El vapor es usado principalmente en el calentamiento de procesos, en la generación de potencia y en la calefacción de determinados espacios.

El vapor se obtiene a partir del agua, la cual está disponible y barata, es limpio e inodoro, insípido y estéril, es de fácil distribución y control, tiene un alto contenido energético, puede usarse para generar potencia y proporcionar calefacción donde se lo requiera.

El vapor se puede producir en cualquiera de las condiciones siguientes: vapor húmedo, vapor saturado seco, vapor sobrecalentado.

Las calderas utilizan el calor para convertir el agua líquida en vapor, que se destina a una gran variedad de aplicaciones, entre las que se encuentran la producción de energía eléctrica y el calentamiento de procesos industriales.

Según (Piña, 2008) Indica que, el vapor es primordial para los procesos industriales y se origina vaporizando el agua, sus condiciones se ajustan con mucha facilidad controlando presiones y temperaturas, y acarrea cantidades importantes de energía, el equipo que forma vapor de agua, es la calderas, el cual es la fuente de generación del vapor de agua.

La operación y el control de equipos que utilizan combustible, requiere de un gran conocimiento y capacitación del personal que interviene en estos equipos y una gran cantidad de empresas utilizan vapor para diferentes aplicaciones, como calefacción, transformación de materia prima, esterilización en hospitales y producción de energía eléctrica.

La formación de las personas encargadas de vigilar, supervisar, operar y dar mantenimiento a cualquier caldera deben estar instruidas adecuadamente en el funcionamiento de la misma, e informadas de los peligros que pueden ocasionar una falsa maniobra, una mala operación o un mal mantenimiento.

Considerando la importancia del tema se incluyen bases teóricas en los dos primeros capítulos que ayudarán a comprender la esencia del trabajo, cuyo contenido es de utilidad para todo aquel que esté involucrado en la generación de vapor por medio de calderas.

El presente trabajo de titulación está compuesto de los siguientes capítulos:

En el capítulo 1 se da una introducción a conceptos fundamentales sobre energía y calor.

En el capítulo 2 se hace un estudio minucioso del ciclo de Rankine tanto en su forma más básica como en sus mejoras y además se describen los fundamentos termodinámicos del vapor.

En el capítulo 3 se da una introducción al tema de las calderas, elementos básicos para su funcionamiento, su clasificación según la función a realizar y se presentan los sistemas fundamentales de la caldera, como es el caso del sistema agua-vapor y el sistema de combustión.

En el capítulo 4 se presentan los riesgos en la operación de las calderas y generalidades de la seguridad en calderas.

En el capítulo 5 se presentan los tipos de lazos de control y luego aplicando la respectiva simbología se estudian lazos de control usados en el funcionamiento de calderas.

En el capítulo 6 se presenta el proceso completo en una central termoeléctrica, se trata en detalle la operación de caldera y equipo complementario para la generación de energía eléctrica, se presenta una secuencia lógica de encendido, calentamiento y presurización de un generador de vapor previo al rodado del turboalternador para una central termoeléctrica, se detalla los pasos para sincronizar el generador eléctrico al sistema eléctrico nacional y luego la sacada de unidad de toda la planta termoeléctrica.

En el capítulo 7 se presenta todo lo relacionado al tratamiento de aguas para calderas de plantas termoeléctricas y se analiza los requerimientos y condiciones que se deben cumplir para evitar depósitos o incrustaciones y corrosiones en los tubos de la caldera.

En el capítulo 8 se presenta lo relacionado a la eficiencia en calderas y luego se hace un estudio del impacto ambiental que producen las calderas para generación de energía eléctrica.

## **PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

En nuestro país se consume más energía de la que se produce, esto nos obliga a importar el faltante. Es necesario salir de esta dependencia con un aprovechamiento eficiente de los recursos con los que cuenta nuestro país, uno de estos recursos es el residuo del petróleo utilizado como combustible para calderas de generación de energía eléctrica. Para ello es indispensable contar con profesionales involucrados en procesos energéticos.

Siendo las calderas modernas las que proporcionan la mayor parte de la fuerza motriz en el mundo, requieren un estudio técnico de nuestra parte para obtener un mayor conocimiento de estos equipos. Las calderas son tema de ingeniería, de leyes físicas y fiscales.

Los generadores de vapor de las centrales termoeléctricas se ven afectados en su rendimiento por pérdidas en transferencia de calor y purgas, lo cual invita a un análisis para minimizar pérdidas y reducir el impacto ambiental.

## **OBJETIVOS GENERALES**

El objetivo principal que se persigue con este proyecto es realizar un análisis de los generadores de vapor en plantas de generación termoeléctricas, teniendo como base para su estudio la aplicación de la mayoría de las materias aprendidas en el pensum académico de nuestra carrera, como Termodinámica, Física, Análisis de planta, Automatización Industrial, Mecánica de fluidos, Maquinas eléctricas, Protecciones eléctricas, Administración de riesgos, Impacto ambiental, Control automático, Controles e instrumentación, etc.

Para desarrollar este objetivo se deberá usar también información relacionada con el Sistema de Encendido, Calentamiento y Presurización de un Generador de Vapor para una Central Termoeléctrica y para esto se tiene la necesidad de ampliar los conocimientos sobre la forma en que se operan los equipos que intervienen en la generación de electricidad.

## **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

1. Describir la importancia de las calderas para la generación de energía eléctrica.
2. Conocer los principales elementos que forman un lazo de control, así como los términos y simbología utilizados en instrumentación
3. Interpretar los principales lazos de control para la automatización en una caldera.
4. Analizar el ciclo de vapor basado en Rankine tanto en su forma básica como el ciclo mejorado de Rankine, basado en sobrecalentamiento, recalentamiento y regeneración. Y con esto obtener mayor eficiencia al ciclo de vapor.
5. Establecer normas de seguridad en plantas de vapor.

6. Ofrecer conceptos básicos al operario sobre cómo aumentar la eficiencia en nuestras calderas para la generación de energía eléctrica.
7. Motivar a los operarios de calderas para generación de energía eléctrica a tener claro el proceso y analizar las posibles fallas que puedan presentarse y corregirlas.

## **HIPÓTESIS**

Con un estudio detallado de los equipos y sistemas de caldera se evitaban paradas innecesarias, puesto que al tener claro el funcionamiento del equipo, las decisiones a tomar serán las mejores.

Con procedimientos en base a experiencia y análisis, se lograra una operación segura en todo momento de estas calderas de vapor para plantas de poder. Y si a esto le agregamos un simulador ubicado en una sala de entrenamiento, que nos permita analizar y simular los principales lazos de control de caldera, estaremos cada vez mejorando en eficiencia, seguridad al personal que labora en las calderas y reduciendo el impacto ambiental.

## **JUSTIFICACIÓN**

Una caldera es un equipo de utilización en la mayoría de las industrias. Las cuales son usadas básicamente en el calentamiento de procesos y en la generación de potencia que es donde vamos a centralizarnos. Pero así mismo como es un equipo de mucha y amplia utilidad representa un riesgo permanente para el trabajador cuando no se tiene clara su operación y sus medidas de seguridad.

La generación de energía con centrales termoeléctricas es importante en horas pico (18:00 a 21:00) para mantener la cota de agua de las centrales hidráulicas, ya que en estas horas es donde el país alcanza la mayor actividad y si el nivel de embalse en centrales hidroeléctricas desciende por debajo de un valor establecido algunas turbinas de estas centrales no podrán funcionar y disminuiría la oferta eléctrica en nuestro país.

Las centrales térmicas a vapor son alternativas importantes en la generación de energía eléctrica. La mayor parte de la generación termoeléctrica se realiza mediante plantas térmicas que funcionan con vapor como fluido de trabajo.

Siendo el sector energético un componente fundamental en la economía de un país queda justificada una investigación sobre este campo. El desarrollo de un país se mide en gran medida por los avances de la tecnología en las industrias.

## **METODOLOGÍA**

La metodología a seguir en este trabajo de investigación es básicamente reunir información de manuales y folletos de calderas, libros de autores reconocidos encontrados en el internet y complementar con la experiencia de laborar como operador de caldera en una central de generación. Todo esto organizarlo para luego presentarlo en citas breves para mayor comprensión y que pueda servir en un futuro para investigación de nueva generación de estudiantes.



# CAPITULO 1

## CONCEPTOS FUNDAMENTALES SOBRE ENERGÍA Y CALOR.

### 1.1 Energía:

Según la (Fundación Asturiana de la Energía, 2009) señala que, la energía es afín con la vida de las personas. Gracias a ella, somos capaces de calentar, encender, transportar o producir fuerza. La energía se obtiene a partir de fuentes o recursos energéticos como pueden ser el viento, el sol, el agua, el carbón, el petróleo o el gas.

Estas fuentes energéticas se denominan energías primarias, ya que son recursos naturales que no se han sometido a ningún proceso de transformación. Estas fuentes pueden ser de dos tipos, renovables o no renovables. Como se puede ver en la figura 1.1.

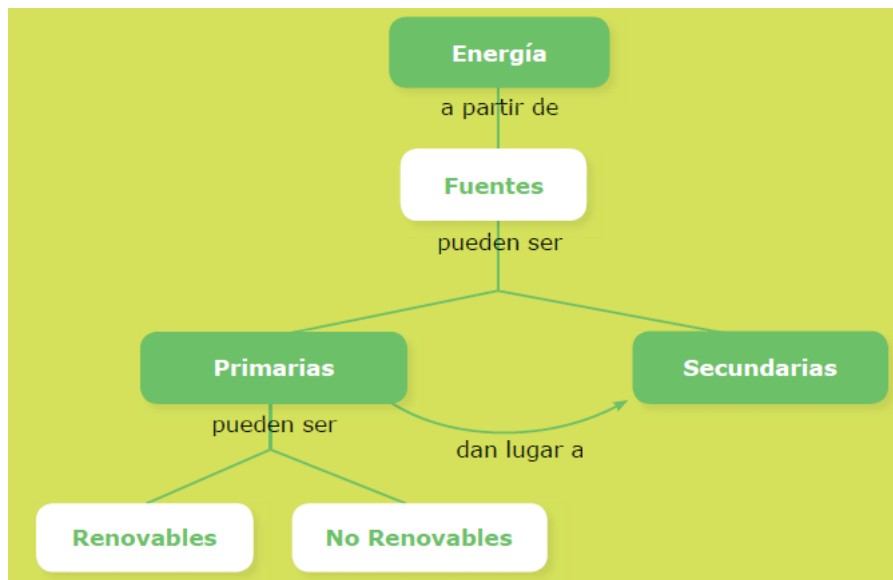


Figura 1.1 Fuentes de energía.  
Fuente: Libro la energía es increíble

- Fuentes o energías renovables son aquellas que son capaces de regenerarse por medios naturales, a un ritmo tan rápido que se pueden considerar inagotables para la escala temporal humana. Las fuentes de energía renovables más utilizadas son el agua, la biomasa, el sol, el viento, y la geotérmica.
- Fuentes o energías no renovables son aquellas cuya capacidad de regeneración por medios naturales es a un ritmo tan lento, que su consumo actual llevaría a su agotamiento. Ejemplos de este tipo de energías son los combustibles fósiles, carbón, petróleo, gas y energía nuclear.

Cuando se utiliza la calefacción o el agua caliente o se encienden las luces, se realiza consumo de energía útil. Se dispone de esta energía útil gracias a las denominadas energías finales, que son aquellas que se ponen a disposición del consumidor para su aprovechamiento (electricidad, gas,...). Ver figura 1.2.

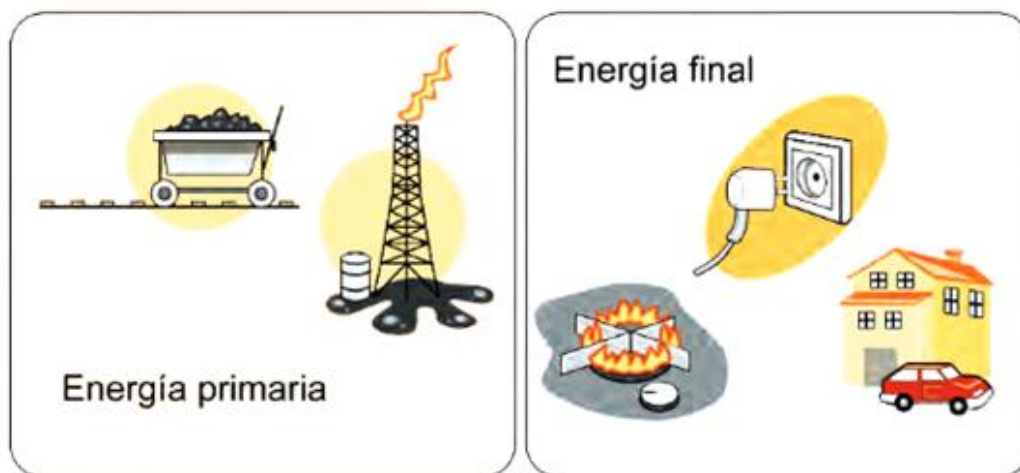


Figura 1.2 Energías primarias y finales.

Fuente: IDAE

A los elementos de la naturaleza que pueden suministrar energía se les denomina fuentes de energía.

La energía puede ser obtenida de gran variedad de fuentes para proveer la iluminación, el calor y la potencia necesaria para una sociedad industrializada. Los combustibles fósiles como el diésel, petróleo y gas natural son no renovables.

Energía primaria es la contenida en los combustibles, antes de pasar por los procesos de transformación a energía final. En nuestro país el petróleo se ha convertido en una de las principales fuentes de energía.

La principal fuente de energía primaria utilizada en el mundo es el carbón, este ha sido responsable de abastecer el 40% de la matriz de generación de EE en forma casi constante desde 1970 hasta la actualidad. En conjunto, los energéticos primarios llamados fósiles pasaron del 75% en 1970 a los actuales 68% del total producido debido a la incorporación de la energía hidráulica y nuclear.

## 1.2 Combustibles fósiles

El 87,8 % de la energía consumida en el mundo en el año 2006 provino de quemar combustibles fósiles (carbón, petróleo, gas natural). Es decir, la mayor parte de la energía usada es energía no renovable que se agota a medida que se utiliza.<sup>1</sup>

El petróleo es actualmente, la principal fuente de energía y una de las materias primas más importantes. Más de la mitad de la energía que mantiene

<sup>1</sup> Proyecto de Eficiencia Energética del Ministerio de Industria, Energía y Minería. Uruguay. "La energía es increable".

en actividad a la población mundial proviene de esta fuente energética. Puesto que es posible transformar la energía de una forma a otra, se analizarán leyes que gobiernan estas transformaciones.

El problema de la disponibilidad y capacidad de transformación de la energía incide en las naciones de manera diferente. Mientras que en los países industrializados dependen de los combustibles fósiles y disponen de los medios económicos para su utilización, en los países en desarrollo, en donde el consumo de energía aumenta con tasas de crecimiento elevadas, se carece generalmente de los medios económicos y tecnológicos para satisfacer la creciente demanda de energía. La gran mayoría de los actuales problemas del mundo contemporáneo están relacionados con los problemas sobre disponibilidad de los recursos energéticos.

### 1.3 Combustión y Combustibles:

Nuestra sociedad se basa en el uso de la energía.

Debemos conocer adecuadamente los procesos de combustión para:

1. Tener el menor impacto razonablemente posible en el entorno
2. Reducir el coste económico de la energía
3. Gestionar unos recursos finitos.

### 1.4 Combustión:

La combustión es un fenómeno químico por medio del cual algunos elementos se combinan con el oxígeno desarrollando calor, es decir es una reacción química exotérmica. Los elementos que dan lugar a esta reacción con el oxígeno se les denomina combustibles.

Según información teórica disponible en la página web: <http://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/4962/2/7833.doc>, Los elementos vitales para que ocurra combustión de calidad, son tres:

- Combustible
- Oxígeno
- Calor como fuente de ignición.

La relación de estos tres requisitos, se aprecia en la figura 1.3.

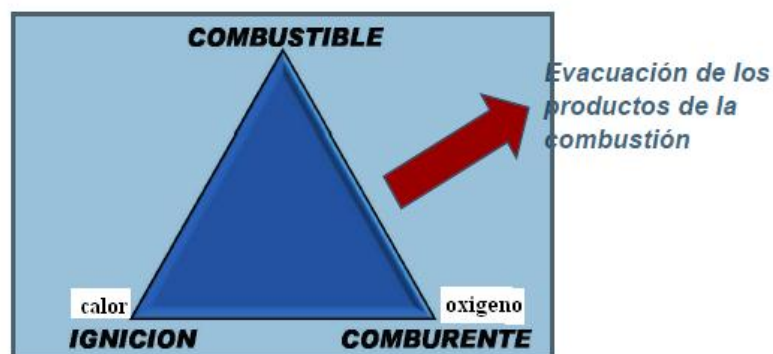


Figura 1.3 Triángulo de la combustión.

Fuente: Calderas eficientes en procesos industriales. José M. Domínguez Cerdeira

## 1.5 Clasificación del combustible.

Los combustibles pueden clasificarse en tres grandes grupos: Sólidos, líquidos y gaseosos, en esta oportunidad haremos referencia principalmente a los combustibles líquidos derivados del petróleo y, específicamente al aceite residual del petróleo llamado Bunker C o Fuel Oil 4 ya que las centrales termoeléctricas a vapor en nuestro país consume este combustible.

Los combustibles contienen tres elementos químicos de significación: el carbono, el hidrogeno y el azufre, este último relacionado con los problemas de corrosión y contaminación.

Algunas características de los combustibles son: Contenido de humedad, densidad, viscosidad, poder calorífico, punto de inflamación, punto de combustión, contenido de azufre y cenizas. La más importante de estas características es el poder calorífico, que consiste en la cantidad de energía calorífica que es capaz de entregar el combustible al ser quemado.

## 1.6 Concepto de energía:

La energía es el trabajo acumulado o la capacidad de realizar un trabajo. "La capacidad de un cuerpo o sistema para producir transformaciones".

La energía y el trabajo mecánico son equivalentes, esto es la energía puede convertirse en trabajo y viceversa. Por lo tanto las unidades que se emplean para la energía son las mismas que para el trabajo, ejemplo el joule, Kilocaloría, etc.

+La mayor parte de energía consumida en el mundo es de origen no renovable.

## 1.7 Las propiedades de la energía

Como ya se analizó anteriormente, una de las propiedades de la energía es la capacidad de pasar de una forma a otra. Para identificar cuáles son estas transformaciones en un cuerpo o sistema, es necesario describir la situación energética inicial y la final, luego de los cambios que se evidencian en dichos cuerpos.

## 1.8 Transformación de la energía

- Energía química: Que se manifiesta en una reacción química. Una batería es un generador de voltaje de corriente continua, en la cual la electricidad se produce por una reacción química. En los procesos de combustión, también se está produciendo una reacción química.
- Energía calórica o térmica: Se manifiesta en un flujo de calor originado a partir de la combustión de un combustible. Siempre que tenemos dos cuerpos a distinta temperatura que no se encuentren aislados, el calor fluye de un cuerpo con más temperatura a uno con menos temperatura.
- Energía eléctrica: Se manifiesta como corriente eléctrica. Su aplicación se presenta en iluminación, calefacción y fuerza motriz. Esta energía

proviene de los generadores y en los receptores se transforma en algo útil.

- **Energía nuclear:** La energía nuclear depende de la fisión controlada de combustible nuclear como fuente de calor, el proceso de fisión implica separación atómica. Cuando esto sucede se libera una gran cantidad de energía que puede usarse para mover un generador eléctrico, por ejemplo.
- **Energía mecánica:** Que se manifiesta en el movimiento de masas. Siempre que tenemos masa en movimiento, tenemos energía mecánica. Por ejemplo una turbina de vapor es una masa en movimiento y posee energía mecánica. Cualquier máquina tiene elementos con materia y por tanto con masa así que cuando se mueve tiene energía mecánica.
- **Energía Hidráulica:** Se refiere a la energía producida por agua en movimiento o embalsada que se hace pasar por conductos para impulsar turbinas.

La figura 1.4 muestra un cuadro de energías para generación de electricidad.

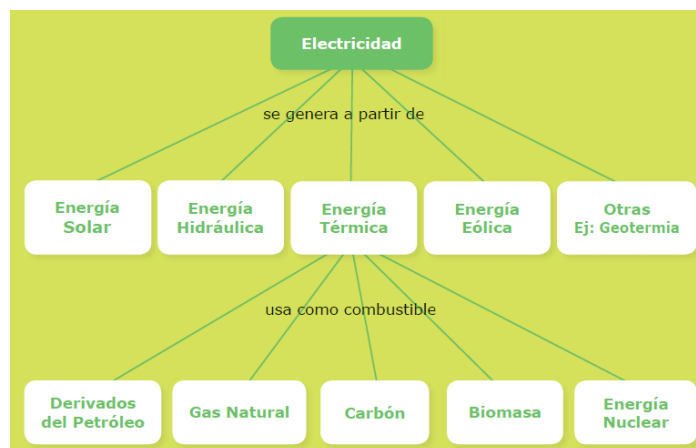


Figura 1.4 Cuadro de energías utilizadas para generar electricidad.

**Fuente:** libro la energía es increaible

### 1.9 Proceso térmico para generación de energía eléctrica

Las transformaciones que se presentan en un proceso térmico para generación de energía eléctrica es el siguiente. Ver figura 1.5.



Figura 1.5 Proceso de la Energía en una Central Térmica.

**Fuente:** Seminario internacional de Seguridad en calderas por Msc. Jorge Balaguera M.

### 1.10 Leyes que gobiernan la energía

Las leyes que gobiernan la energía son la primera y la segunda ley de la termodinámica.

#### Primera ley de la termodinámica

La formulación común de la primera ley de la termodinámica es:

“La energía no puede ser creada ni destruida sino que solamente puede transformarse de una forma a otra”.

(Principio de la conservación de la energía)

Si el estado de un sistema cambia al recibir una determinada cantidad de calor  $dQ$  y con este cambio el sistema realiza una cantidad de trabajo  $dW$ , entonces, de acuerdo a la primera ley de la termodinámica, la cantidad de calor del sistema es igual al trabajo externo realizado por el sistema y al cambio de energía interna del mismo  $dU$ :

$$dQ = dU + dW$$

#### Segunda ley de la termodinámica

La segunda ley de la termodinámica tiene tres principios los cuales son los siguientes:

- 1) En un sistema cerrado el calor no puede fluir espontáneamente de un cuerpo frío a uno caliente.
- 2) Es imposible construir una máquina térmica que opere en un ciclo y que reciba una cantidad de calor de un cuerpo de alta temperatura y que ejecute una cantidad igual de trabajo. Esto significa que es imposible construir una máquina térmica que tenga un rendimiento del 100%.
- 3) Un sistema cerrado, con el tiempo tenderá a volverse más desordenado.

## 1.11 Calor

El calor es una manifestación de la energía provocada por el movimiento molecular, (el calor es energía en tránsito); fluye de una zona de mayor temperatura a una zona de menor temperatura, con lo que eleva la temperatura de la segunda y reduce la primera, siempre que el volumen de los cuerpos se mantenga constante. La energía no fluye desde un objeto de temperatura baja a un objeto de temperatura alta si no se realiza trabajo.

Algunos efectos conocidos del calor son:

- ❖ Cambios de estado físico como fundir cuerpos sólidos y evaporar los líquidos.
- ❖ Cambios de volumen como dilatar sólidos, líquidos y gases
- ❖ Cambiar el color de los cuerpos.
- ❖ Todo cuerpo capaz de calentar a otro es considerado como una fuente de calor.

## 1.12 Transferencia de calor:

Transferencia de calor, es el paso de energía térmica de una sustancia a otra. El calor siempre se transmite del cuerpo de mayor temperatura al de menor temperatura, hasta que esta se iguala en ambos.

Los mecanismos de transferencia de energía son de tres tipos:

- Conducción
- Convección térmica
- Radiación

### Conducción:

La conducción es un mecanismo de transferencia de calor entre dos sistemas basado en el contacto directo de sus partículas sin desplazamiento de estas, en la cual se considera el paso directo del calor de un cuerpo a otro. Es típica en los sólidos.

Por ejemplo, si sujetamos una barra de hierro por un extremo y el otro lo exponemos al calor de una plancha, al momento notaremos que nos llega calor a nuestra mano.

El calor no se transmite con la misma facilidad por todos los cuerpos. Existen los denominados “buenos conductores del calor”, que son aquellos materiales que permiten el paso del calor a través de ellos. Los “malos conductores o aislantes” son los que oponen mucha resistencia al paso del calor.

## Convección térmica

La convección se caracteriza porque la transformación de calor se produce por intermedio de un fluido (aire, agua) que transporta calor entre zonas con diferentes temperaturas. La convección se produce únicamente por medio de materiales fluidos. Estos, al calentarse, aumentan de volumen y, por tanto, su densidad disminuye y ascienden desplazando el fluido que se encuentra en la parte superior y que está a menor temperatura. Lo que se llama convección en sí, es el transporte del calor por medio de corrientes ascendente y descendente del fluido.

Es típica en líquidos y gases. Por ejemplo si ponemos la mano cerca de la estufa encendida notaremos su calor, debido a que el aire que rodea la estufa pierde densidad y asciende siendo reemplazado por aire frío que desciende.

## Radiación

Es la transmisión del calor por medio de ondas sin la necesidad de un medio material que lo transmita. Por ejemplo el calor que nos llega del sol.

En la figura 1.6 se muestran los tipos de transmisión de calor.

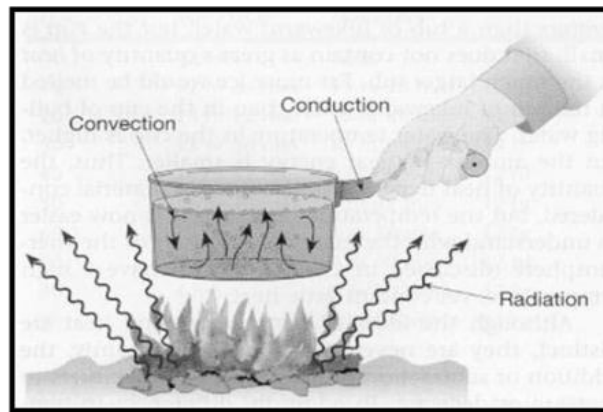


Figura 1.6 Esquema de los mecanismos de transferencia de calor

**Fuente:** [www.monografias.com/trabajos88/calor-conceptos-y-tipos-transferencia-calor/calor-conceptos-y-tipos-transferencia-calor](http://www.monografias.com/trabajos88/calor-conceptos-y-tipos-transferencia-calor/calor-conceptos-y-tipos-transferencia-calor).



## CAPITULO 2

### FUNDAMENTOS SOBRE LA GENERACIÓN DE VAPOR

#### 2.1 Ciclo Rankine

El ciclo de Rankine es el ciclo ideal que sirve de base al funcionamiento de las centrales térmicas con turbinas de vapor, las cuales producen actualmente la mayor parte de la energía eléctrica que se consume en el mundo.

Las plantas térmicas a vapor trabajan fundamentalmente con un ciclo mejorado de Rankine, básicamente con un suministro de energía para la combustión de combustibles fósiles (Carbón, gas o petróleo). Durante el proceso del ciclo la sustancia de trabajo toma dos fases la de vapor y la de líquido.

Este ciclo está compuesto de los siguientes cuatro procesos (Ver figura 2.1):

1. Compresión isentrópica en una bomba
2. Adición de calor a presión constante en una caldera
3. Expansión isentrópica en una turbina
4. Rechazo de calor a presión constante en un condensador.

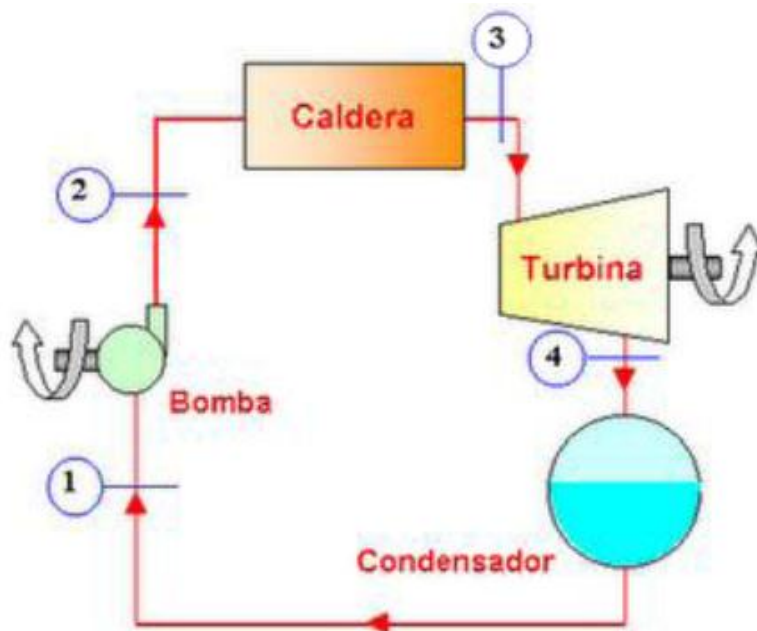


Figura 2.1 Ciclo de Rankine simple.

**Fuente:** Cengel, Y. Boles, M. Termodinámica. 6 ed. México D.F: Mc Graw Hill, 2009.

El ciclo Rankine se lo aplica en las centrales eléctricas de generación de energía eléctrica, cuyos componentes principales son:

- ❖ Caldera: su función es la de generar el vapor necesario para el funcionamiento de la turbina.
- ❖ Turbina: es la encargada de utilizar la energía del vapor de la caldera y transformarla en trabajo útil para mover un generador eléctrico.
- ❖ Condensador: se emplea para condensar el vapor que sale de la turbina.
- ❖ Bomba de alta presión: usada para alimentar la caldera con el agua que proviene del condensador.

El ciclo ideal de Rankine 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. Según conceptos disponibles en la página; [http://termoaplicadaunefm.files.wordpress.com/2009/05/ejercicios-resueltos-y-propuestos-del-ciclo-rankine-simple.docx.](http://termoaplicadaunefm.files.wordpress.com/2009/05/ejercicios-resueltos-y-propuestos-del-ciclo-rankine-simple.docx), La temperatura del agua aumenta un poco durante este proceso de compresión isentrópica debido a una ligera disminución en el volumen específico del agua.

El agua entra a la caldera como líquido comprimido en el estado 2 y Sale como gas de agua sobrecalentado en el estado 3. La caldera es básicamente un gran intercambiador de calor donde el calor que se origina en los gases de combustión, reactores nucleares u otras fuentes, se transfiere al agua esencialmente a presión constante. El vapor sobrecalentado en el estado 3 entra a la turbina donde se expande isentrópicamente y produce trabajo al hacer girar el eje conectado a un generador eléctrico. La presión y la temperatura del vapor disminuyen durante este proceso hasta los valores en el estado 4, donde el vapor entra al condensador.

El vapor se condensa a presión constante en el condensador, el cual es básicamente un gran intercambiador de calor, rechazando el calor hacia un medio de enfriamiento como un lago, un río o la atmósfera. El vapor sale del condensador como líquido saturado y entra a la bomba, completando el ciclo.

Un ciclo de vapor se compone de procesos de transferencia de calor a presión constante (hacia el fluido de trabajo en el generador de vapor y desde el fluido de trabajo en el condensador) y de procesos de trabajo adiabático (adición de trabajo por la bomba y entrega de trabajo por la turbina).

Solamente plantas de muy pequeña capacidad podrían funcionar con el ciclo básico de Rankine. Lo estudiamos, porque nos permite evaluar de manera simple el efecto que tienen sobre la eficiencia del ciclo la presión del vapor, temperatura y presión de vacío en el condensador.

## **2.2 Modificaciones para mejorar el rendimiento de un Ciclo Rankine**

### **2.2.1 Ciclo Rankine con Sobrecalentamiento**

El fluido de trabajo (Agua), una vez que se evapora y toma el estado de vapor saturado, continúa recibiendo calor a presión constante hasta llegar a un vapor seco. El vapor seco continúa recibiendo calor y pasa a ser vapor sobrecalentado hasta un nivel de temperatura.

Durante el proceso (ver figura 2.2), el vapor sobrecalentado que sale del generador de vapor a una determinada temperatura, se expande en la turbina en un proceso adiabático reversible, realizando un trabajo y saliendo de ella como

vapor húmedo a una temperatura inferior, a continuación este vapor entra a un condensador donde se condensa y sale como líquido. Este a su vez es tomado por una bomba de alimentación para reingresar a la caldera.

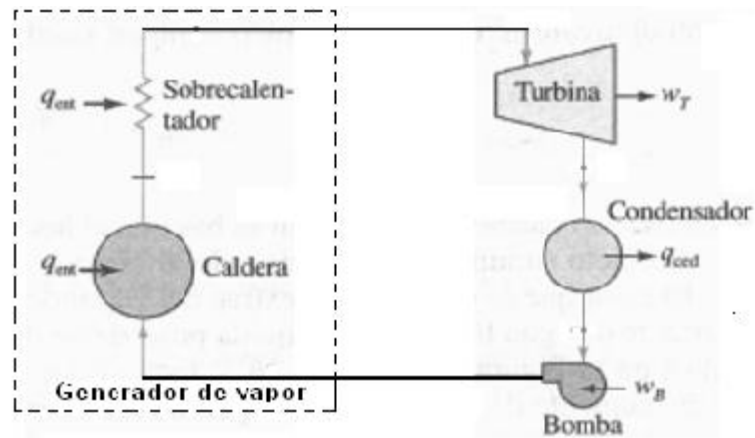


Fig. 2.2 Diagrama del ciclo Rankine simple con sobrecalentamiento.  
**Fuente:** Kenneth Wark y Donald Richards, "Termodinámica", sexta edición.

### 2.2.2 Ciclo Rankine con Recalentamiento

En el ciclo con recalentamiento, el vapor que se expande en la etapa de alta presión de la turbina, regresa al generador de vapor, donde se recalienta a presión constante. Posteriormente se expande en la etapa de intermedia presión de turbina, donde nuevamente tiene la característica de vapor saturado, luego este vapor es tomado por el condensador para cerrar su ciclo, como lo muestra la figura 2.3.

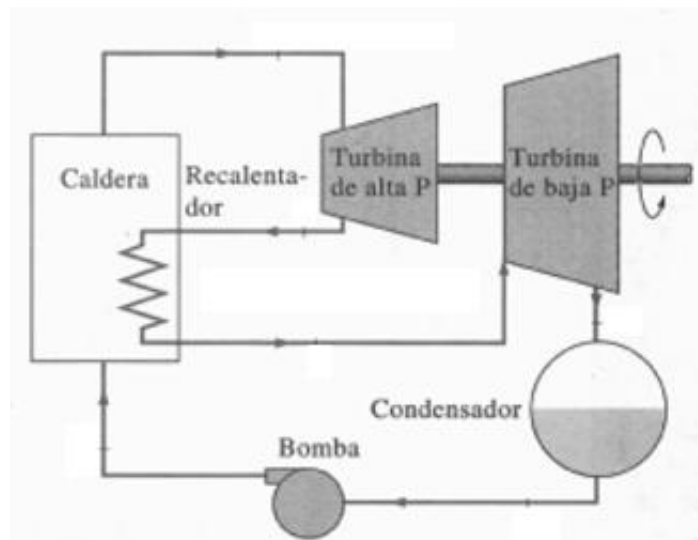


Fig.2.3 El ciclo Rankine con recalentamiento.  
**Fuente:** Kenneth Wark y Donald Richards. "Termodinámica", sexta edición

El vapor después de expandirse en una turbina de alta presión, se vuelve a calentar en la misma caldera, generalmente, para volverlo a expandir, con la misma temperatura de entrada pero menor presión, en las llamadas turbinas de baja y media presión.

### 2.2.3 Ciclo Rankine Regenerativo

El ciclo regenerativo (con extracciones), se caracteriza por precalentar el condensado en varias etapas con vapor extraído de la turbina. Se extrae vapor a presiones diferentes en uno o más sitios de las diferentes etapas de la turbina y se pasa por uno o más calentadores de agua de alimentación. Las extracciones de vapor en la turbina se hacen en puntos intermedios de ella, normalmente en sitios donde se pasa de un sistema de alabes a otro. Los intercambiadores utilizados pueden ser: abiertos o cerrados.

En la práctica todas las plantas modernas trabajan bajo este esquema que también puede tener recalentamiento intermedio. Uno de los calentadores es usualmente de tipo abierto y opera como desaireador para remover gases disueltos en el agua de alimentación.

#### 2.2.3.1 Ciclo Rankine con calentadores abiertos

En los calentadores abiertos también llamados de contacto directo, el agua y el vapor se mezclan. Los flujos másicos que entran al calentador deben ajustarse, de manera que el resultado de la mezcla a la salida del calentador sea líquido saturado a determinada presión. Las presiones de entrada deben ser iguales, para que no se produzcan retornos indeseables en las líneas de tuberías. Ver figura 2.4.

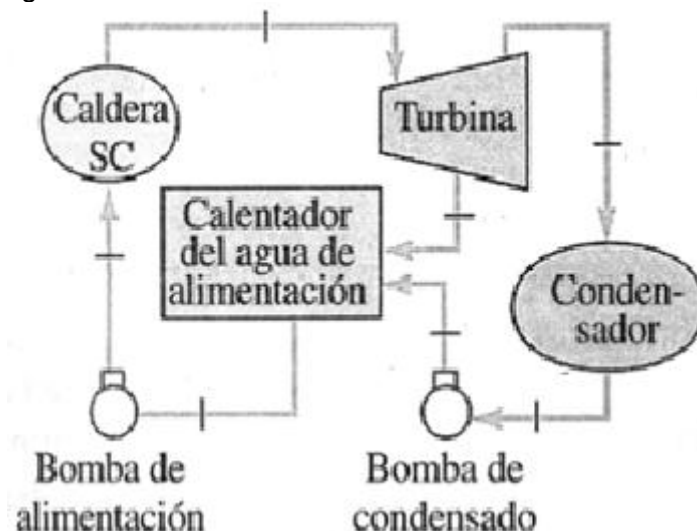


Figura 2.4 Ciclo regenerativo de vapor con calentador abierto.  
Fuente: Kenneth Wark y Donald Richards, "Termodinámica", sexta edición.

#### 2.2.3.2 Ciclo Rankine con calentadores cerrado

En los calentadores cerrados no hay mezcla entre el condensado y el vapor que proviene de la extracción de turbina. El agua de condensado (en baja presión) o el agua de alimentación (en alta presión) circula por el interior de los

tubos que pasan por el calentador y el vapor proveniente de la extracción de turbina precalienta el agua y este vapor se condensa sobre los tubos del calentador. Los calentadores cerrados al no estar en contacto directo las presiones de las dos corrientes que entran pueden ser distintas. El vapor que se condensa en el calentador cerrado debe ser evacuado o drenado. Ver figura 2.5.

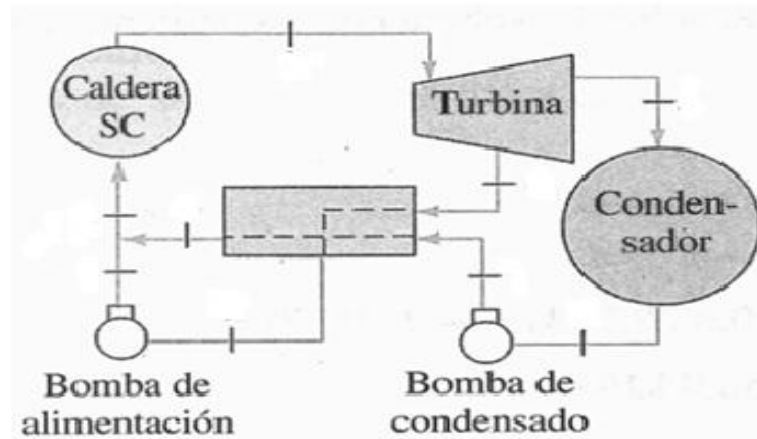


Figura 2.5 Ciclo regenerativo de vapor con calentador cerrado.

Fuente: Kenneth Wark y Donald Richards, "Termodinámica", sexta edición.

### 2.3 El proceso del ciclo:

Según la teoría disponible en la página <http://alejogilalva.wordpress.com/tercer-corte/ciclos-termo-dinamicos/ciclo-de-rankine/>, El ciclo *Rankine* es un ciclo de potencia representativo del proceso termodinámico que tiene lugar en una central térmica de vapor. Utiliza un fluido de trabajo que alternativamente evapora y condensa, típicamente agua (si bien existen otros tipos de sustancias que pueden ser utilizados, como en los ciclos Rankine orgánicos). Mediante la quema de un combustible, el vapor de agua es producido en una caldera a alta presión para luego ser llevado a una turbina donde se expande para generar trabajo mecánico en su eje (este eje, solidariamente unido al de un generador eléctrico, es el que generará la electricidad en la central térmica).

El vapor de baja presión que sale de la turbina se introduce en un condensador, equipo donde el vapor condensa y cambia al estado líquido (habitualmente el calor es evacuado mediante una corriente de refrigeración procedente del mar, de un río o de un lago). Posteriormente, una bomba se encarga de aumentar la presión del fluido en fase líquida para volver a introducirlo nuevamente en la caldera, cerrando de esta manera el ciclo. Existen algunas mejoras al ciclo descrito que permiten mejorar su eficiencia, como por ejemplo sobrecalentamiento del vapor a la entrada de la turbina, recalentamiento entre etapas de turbina y regeneración del agua de alimentación a caldera. En el siguiente gráfico de la figura 2.6 se muestra el diagrama completo de una central termoeléctrica que utiliza un ciclo Rankine con todas las mejoras.

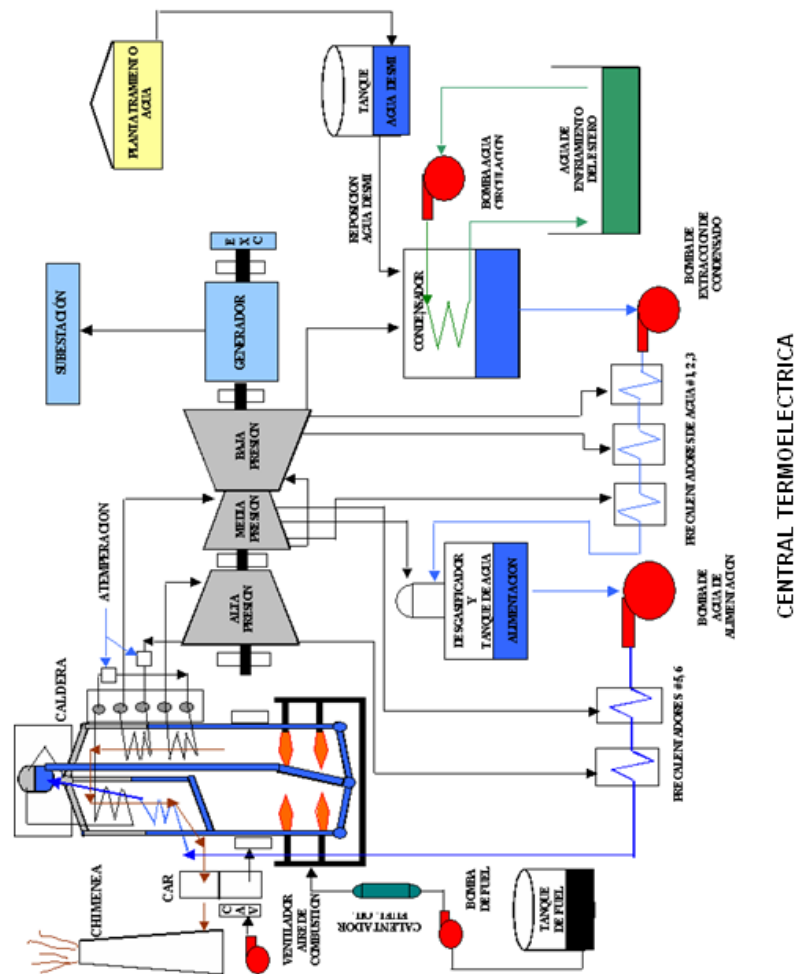


Figura 2.6 Proceso completo de un ciclo de potencia para generación eléctrica.  
**Fuente:** Cortesía Central Trinitaria.

## 2.4 Efectos de la presión y la temperatura en el ciclo Rankine:

Se puede mejorar la eficiencia del ciclo de Rankine aumentando la temperatura a la que el calor se transfiere al fluido de trabajo del generador de vapor o cuando se tiene una disminución de temperatura en la que el calor se rechaza del fluido de trabajo en el condensador. La presión en el condensador mientras mas baja sea, mas alta será la eficiencia térmica del ciclo.

## 2.5 Mejoras del rendimiento de un ciclo de potencia:

- Aumento de la presión de caldera.
- Aumento de la temperatura de sobrecalentado.
- Descenso de la temperatura del condensador que es la fuente fría.
- Precalentamiento de agua de alimentación (ciclo regenerativo).
- Recalentamiento de vapor.
- Precalentamiento de agua de alimentación.
- Precalentamiento del aire de combustión.

## 2.6 Fundamentos termodinámicos del vapor:

Para una mejor comprensión del tema de las calderas se define a continuación una serie de conceptos comúnmente utilizados en este campo:

### 2.6.1 Vapor

El vapor es el estado vaporizado o gaseoso del agua el cual contiene energía calorífica que generalmente es transferida a una gran variedad de procesos desde calentamiento del aire hasta líquidos que vaporizan en los procesos de refinamiento. Las propiedades del vapor, varían dependiendo de las condiciones de presión y temperatura a la que se encuentra sujeto. Para el caso del vapor de agua, las variaciones existentes se clasifican de la siguiente forma.

### 2.6.2 Tipos de vapor

- ❖ Vapor saturado.
- ❖ Vapor húmedo
- ❖ Vapor recalentado.
- ❖ Vapor sobrecalentado.

Vapor saturado. Es el vapor que esta a la misma temperatura y presión en la cual ocurre la evaporación, es decir una temperatura específica para cada presión, de tal manera que la temperatura se incrementa proporcionalmente con la presión.

Vapor húmedo. Es un vapor que contiene pequeñas gotas de agua condensada, estas gotas de agua no transportan entalpía específica de evaporación. Este vapor se produce cuando el agua se aproxima al estado de saturación y comienza a evaporarse, pero una pequeña porción de agua generalmente en forma de gotas, es arrastrada en el flujo de vapor y a los puntos de distribución.

Vapor recalentado. Es el vapor que se vuelve a calentar en la caldera una vez que ya trabajo en turbina y que sale con menor presión y temperatura. Esto con el objetivo de aprovecharlo al máximo y hacerlo trabajar en las siguientes etapas de turbina.

Vapor sobrecalentado. Es el vapor calentado a una temperatura más alta que la que corresponde a la temperatura equivalente a su presión. Es decir, es un vapor a una temperatura mayor a la del punto de ebullición. Lo que quiere decir, que es un vapor que contiene mayor temperatura y menor densidad que el vapor saturado a una misma presión. Este vapor es usado principalmente para el movimiento-impulso de equipos rotativos como las turbinas de vapor.

## 2.7 Procesos termodinámicos

Cuando cambia alguna propiedad del sistema, el estado del sistema cambia.

Tipos especiales de procesos:

- ❖ Isoterma: la temperatura permanece constante
- ❖ Isóbarica: la presión permanece constante
- ❖ Isocórica: el volumen permanece constante
- ❖ Adiabática: Sin intercambio de calor

Ósea:

P=Cte. Isobara  
V=Cte. Isocoro  
T= Cte. isoterma  
Q=0 adiabático

## 2.8 Conceptos termodinámicos

Poder calorífico. Es la cantidad de calor desarrollada por la combustión completa de una unidad de peso de un combustible. Se expresa en Kcal / Kg.

Entalpia. Es el contenido calórico de un fluido. Cantidad total de energía contenida en una unidad de masa de una determinada sustancia, que es igual a la energía interna más el producto de la presión con su volumen específico. Es la cantidad de energía que un sistema puede intercambiar con su entorno.

La entalpia es una magnitud de termodinámica simbolizada con la H. La variación de entalpia expresa una medida de la cantidad de energía absorbida o cedida por un sistema termodinámico, o, lo que es lo mismo, la cantidad de energía que tal sistema puede intercambiar con su entorno. Usualmente la entalpia se mide, dentro del Sistema Internacional de Unidades, en joules.

La entalpia se define mediante la siguiente formula:

$$H= U + Pv$$

Donde

- U es la energía interna
- P es la presión del sistema
- V es el volumen del sistema

Entropía. Es el grado de desorden que poseen las moléculas que integran un cuerpo. Es una magnitud que mide la parte de la energía que no puede utilizarse para producir trabajo.

Calor sensible. Es el calor empleado en la variación de temperatura, de una sustancia cuando se le comunica o sustrae calor. La entalpia del agua saturada es la energía calorífica que eleva la temperatura del agua.

Calor latente. Es el calor que, sin afectar a la temperatura, es necesario adicionar o sustraer a una sustancia para el cambio de su estado físico. Es la cantidad de calor necesaria para convertir 1Kg. de agua que esta a 100°C en vapor de agua a la misma temperatura. Es la entalpia de evaporación o la cantidad de calor que produce un cambio en el estado liquido del agua a gas.



Calor específico. Se refiere a la capacidad relativa de una sustancia para absorber calor.

## 2.9 Conceptos básicos de fluidos

- Fluido: Es todo material que no sea sólido y que puede 'fluir'. Son fluidos los líquidos y los gases; aún con sus grandes diferencias su comportamiento como fluido se describe con las mismas ecuaciones básicas. La diferencia entre uno u otro está en su compresibilidad.
- Viscosidad: Es una medida de la resistencia del fluido a su movimiento. Los líquidos se caracterizan por una resistencia al flujo llamada viscosidad. La viscosidad de un líquido disminuye al aumentar la temperatura y aumenta al crecer la presión.
- Densidad: La densidad de un cuerpo es el cociente entre su masa y su volumen".  
Representa la masa que correspondería a la unidad de volumen de la sustancia considerada.
- Presión manométrica: Es la presión arriba de la presión atmosférica. Es la presión leída en un manómetro y que representa la presión ejercida por el vapor, por encima de la presión atmosférica.
- Presión absoluta: La presión desde y arriba del vacío perfecto.
- Fuerza: Es la causa que produce un cambio de dirección velocidad.
- Presión: Es la fuerza ejercida en un área determinada.
- Trabajo: Es la fuerza necesaria para desplazar un elemento en una distancia determinada.
- Flujo: Es el movimiento del líquido.
- Caudal: Es volumen desplazado en una unidad de tiempo.
- Area: Es la superficie largo por ancho.
- Volumen: Una área por una altura.

## CAPITULO 3

### DESCRIPCIÓN Y SISTEMAS DE CALDERAS

#### 3.1 Generalidades

Una caldera y/o generador de vapor es un equipo o instalación diseñado y construido para producir vapor con determinadas características de presión y temperatura. En su presentación básica comprende un área destinada a la combustión del combustible, paredes de agua, un calderín o domo, economizador, sobrecalentador. Como puede verse en la figura 3.1.

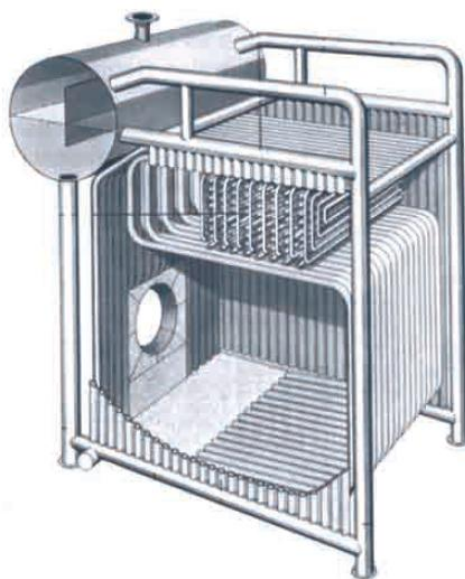


Figura 3.1 Caldera acuotubular.

**Fuente:** Guía Básica Calderas industriales. Eficientes Dirección de Industria, Energía y minas de la comunidad de Madrid.

#### 3.2 Elementos de funcionamiento de una caldera

Fuego: Que se produce con el fenómeno de la combustión.

Agua: El agua de alimentación debe tener tratamiento químico.

Áreas de intercambio de calor: Se deben usar sopladores de hollín para mantener las superficies de transferencia de calor limpias.

➤ **Fuego:**

Los combustibles y su combustión representan la manera más práctica, efectiva y económica de aportar la energía térmica requerida en calderas de vapor. El objetivo fundamental de la combustión es el de conseguir la oxidación total del carbono y del hidrógeno en el combustible.

Para que se de el fenómeno de la combustión es necesario que exista un combustible, un comburente (aire) y un elemento externo que produzca la ignición (chispa). Cuando se combinan estos tres elementos se produce la reacción química llamada combustión y se libera energía en forma de calor. Este calor se lo aprovecha para evaporar el agua en calderas.

➤ Agua:

Los generadores de vapor que trabajan con presiones muy elevadas requieren de un tratamiento de desgasificación y desmineralización para el agua de alimentación.

El agua que circula por un generador de vapor debe tener cierto grado de pureza ya que toda la impureza que tenga termina por depositarse como incrustaciones en las superficies internas de los tubos evaporadores obstruyendo la transmisión de calor y la libre circulación de agua. El tratamiento de desgasificación y desmineralización se efectúa en instalaciones especiales para ello.

➤ Superficie de intercambio de calor:

En las áreas de transferencia de calor, la zona de convección es una de las zonas de mayor cuidado ya que su mantenimiento es difícil de realizar por lo incomodo del acceso. El cuidado debe enfocarse en una continuidad en el sistema de soplado de hollín, para mantener las superficies de transferencia en estado optimo de limpieza.

Un diagrama básico de una caldera podría representarse como se muestra en la Figura 3.2.

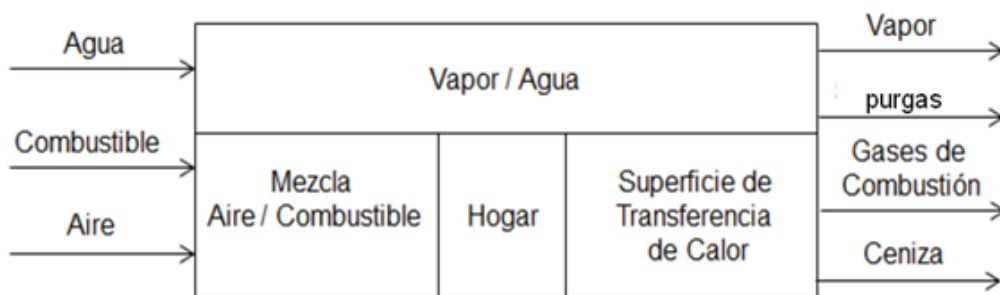


Figura 3.2 Diagrama basico de una caldera

**Fuente:** Curso isa control y seguridades de calderas de vapor.

En la figura 3.2 se pueden diferenciar dos sistemas distintos. El primero sería el sistema agua-vapor. En él, el agua que se introduce en la caldera es convertida en vapor, que sale de la caldera al recibir el calor necesario mediante la transferencia de calor a través del metal de los tubos. El segundo sistema es de combustible-aire-gases que es el que proporcionará el calor que se transmite al agua.

En este sistema, el aire y el combustible se mezclan y queman en el hogar. El hogar esta formado por paredes de tubos de agua que reciben el calor radiante de la llama y es por tanto donde se produce la máxima transferencia de calor. Los gases de combustión, como resultante de esta pérdida de calor, se enfrían y abandonan el hogar pasando a la zona de recuperación de calor formada por tubos de vapor en donde la llama ya no se ve y el calor se transmite por convección. Como la transmisión de calor depende, entre otras cosas, de que exista una diferencia de temperatura, la temperatura de salida de los gases será siempre algo superior a la temperatura menor del circuito agua-vapor.

Esta pérdida de calor disminuye el rendimiento del ciclo. Al objeto de elevar dicho rendimiento, los gases de combustión suelen pasarse por algún tipo de intercambiador de calor. Un primer ejemplo sería la instalación de un

economizador (Figura 3.3), que consiste en un conjunto de tubos de agua expuestos a los gases tras la zona de recuperación de calor, con el propósito de calentar el agua de alimentación y aprovechar al máximo el calor de los gases de la combustión antes de abandonar la caldera.

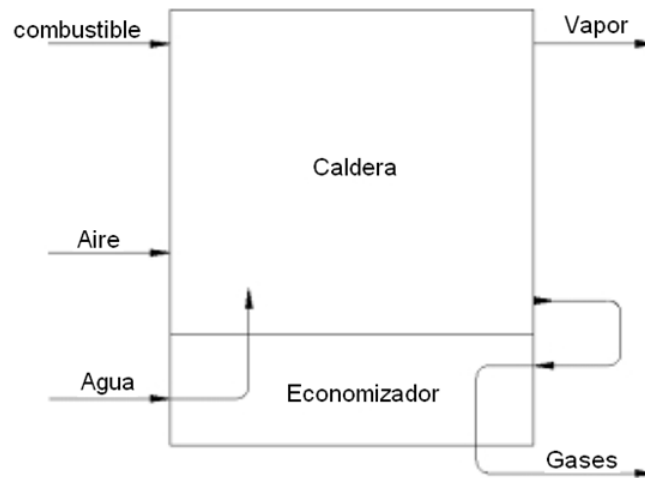


Figura 3.3 Caldera con economizador

**Fuente:** Curso isa control y seguridades de calderas de vapor.

Una segunda posibilidad sería aprovecharlos para elevar la temperatura del aire de entrada en lo que se conoce como precalentador de aire (Figura 3.4). En este caso se debe considerar que dichos gases pueden tener limitada su mínima temperatura si en su composición está presente el azufre. En aquellas instalaciones en las que es posible la instalación de ambos equipos lo normal sería pasar primero los gases por el economizador y después por el precalentador.

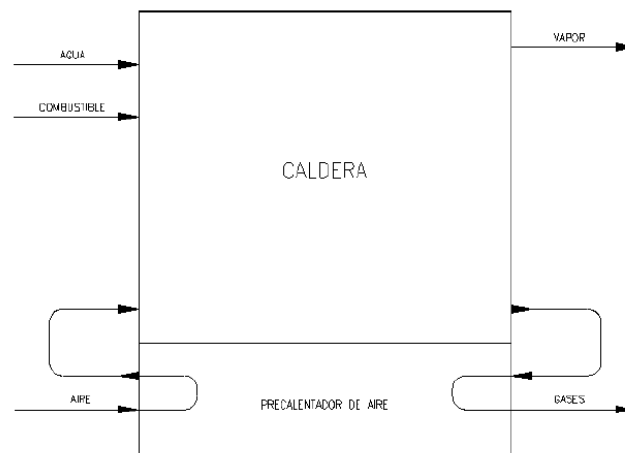


Figura 3.4 Caldera con precalentador de aire

**Fuente:** Curso isa control y seguridades de calderas de vapor.

Sabemos que las calderas se clasifican en dos grandes grupos:

- Calderas acuotubulares
- Calderas pirotubulares

Nuestro estudio se va a dirigir solo a las calderas acuotubulares por ser ellas las que pueden manejar muy altas presiones y sirven para mover los turboalternadores de potencia. Las grandes calderas para generación de electricidad, se diseñan para quemar carbón pulverizado, residuo del petróleo o bunker, gas, etc. El tipo de combustible usado en los generadores de vapor en nuestro país es el diésel y el bunker.

#### Definición Caldera:

Recipiente cerrado en el que se calienta agua, se genera vapor, o bien una combinación de ambos, bajo presión o vacío por la aplicación del calor de los combustibles, electricidad o energía nuclear. El término no incluye aquellas instalaciones o partes de una unidad de un proceso continuo pero incluye los quemadores o calentadores o líquidos vaporizadores, además del agua donde estas unidades están separadas de los sistemas de procesos y están completas en su conjunto.

#### Definición Generador de Vapor:

El termino generador de vapor se utiliza para indicar una gran caldera con muchos componentes en la superficie de calefacción, esta equipada con un equipo de combustión, paredes tapizada de tubos de agua, economizador, sobrecalentador, recalentador, atemperadores, equipo de tiro forzado, equipo de precalentamiento de aire, equipo de precalentamiento de agua, e inclusive instalación para desmineralizar el agua.

### **3.3 Descripción de un generador de vapor**

Un generador de vapor es utilizado en las centrales térmicas para generar vapor, habitualmente vapor de agua, con energía suficiente como para hacer funcionar una turbina en un ciclo de Rankine modificado. Los generadores de vapor se diferencian de las calderas por ser mucho más grandes y complicados.

El mecanismo que produce el vapor es un equipo que lo forman varios elementos que absorbe calor de los productos de esta deflagración en forma eficiente. Ver figura 3.5.

Objetivos:

- Realizar una combustión para liberar energía en forma de calor
- Producir vapor con determinadas características de presión y temperatura.

Para que el generador de vapor pueda cumplir estos objetivos se le debe suministrar agua de alimentación previamente tratada y calentada.

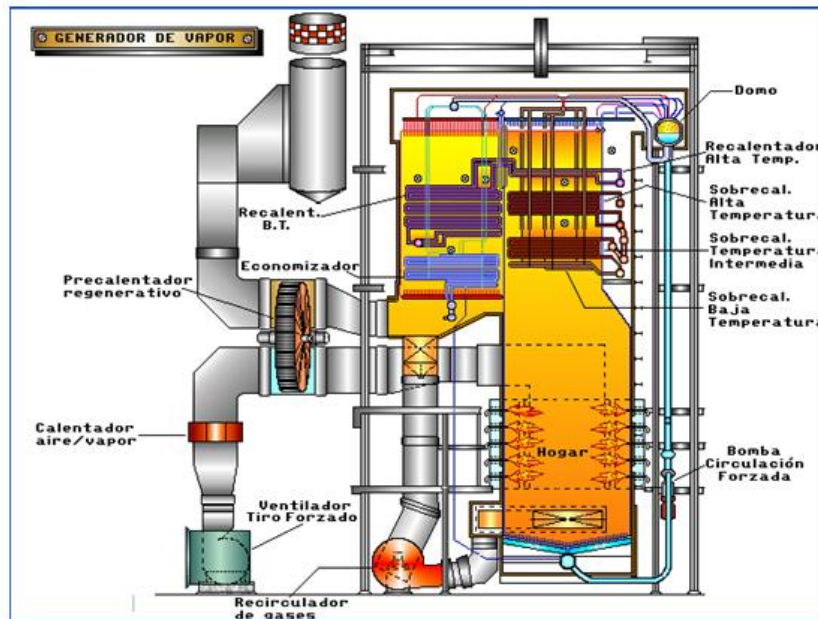


Figura 3.5 Descripción completa de un generador de vapor  
Fuente: Dedución de fallas en Centrales Termoeléctricas. CFE

### 3.4 Partes principales de un generador de vapor

- ❖ Hogar (fogón)
- ❖ Domo
- ❖ Tambor de lodos
- ❖ Equipos recuperadores de calor:
  - Economizador
  - Sobrecalentador
  - Recalentador
  - Precalentador de aire por vapor
  - Calentador de aire regenerativo
  - Chimenea

### 3.5 Descripción general de los equipos de un generador de vapor

#### 3.5.1 Domo o tambor de vapor:

El domo superior es un recipiente cilíndrico horizontal que recibe el agua de alimentación bombeada externamente, en los generadores de vapor el agua de alimentación se hace pasar previamente por el economizador donde se eleva la temperatura del agua de alimentación. Se encuentra localizado en la parte superior del generador de vapor y tiene la función de recibir, almacenar y distribuir el agua de alimentación a los tubos bajantes, así como también recibir la mezcla de agua vapor de las paredes de generación para que los dispositivos de internos del domo separen las partículas del agua del vapor. El vapor sale por

la parte superior y se lo conduce a un sobrecalentador así como a determinados procesos que requieren vapor para calentamiento. El domo no está expuesto al calor. En el tambor de vapor se instalan válvulas de alivio o de escape para proteger al sistema.

El método de separación del agua y del vapor se realiza en un separador mecánico o en un separador ciclónico. La fuerza centrífuga en el ciclón separa las gotas de agua, y el vapor sale del ciclón y pasa a través de más separadores hasta que se tiene vapor relativamente seco para uso en las unidades de proceso. Ver figuras 3.6.1 y 3.6.2.

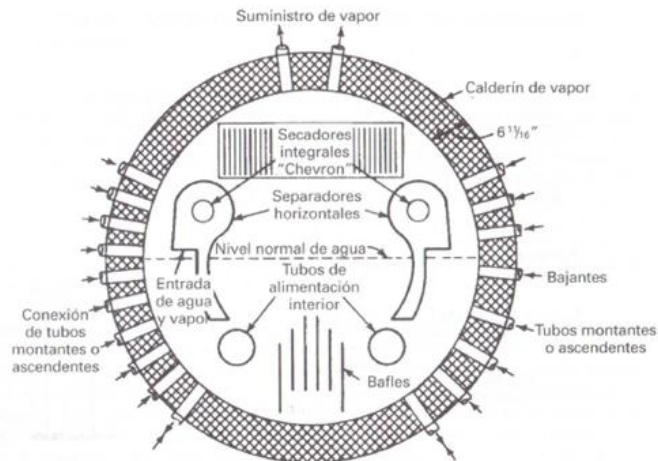


Figura 3.6.1 Partes internas de un domo o calderín  
**Fuente:** Manual de calderas de Kohan, Anthony.

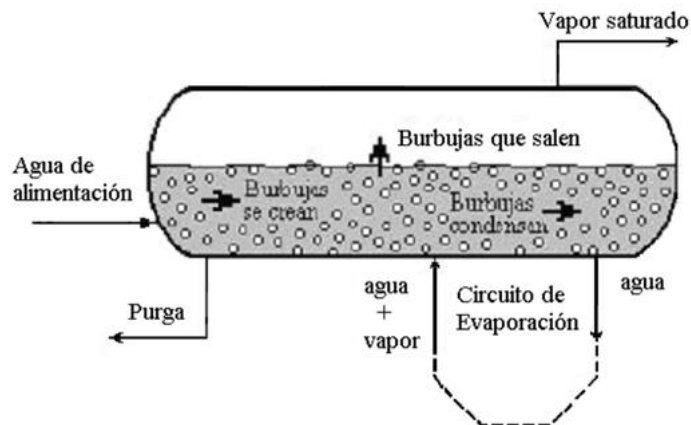


Figura 3.6.2 Diagrama de flujos del domo o calderín  
**Fuente:** Sánchez, Eugenio. "Control difuso de nivel y presión de vapor en el domo de un generador".

### 3.5.2 Paredes de agua.

Las paredes de agua son las principales superficies de generación de vapor en la caldera, están conformadas por el conjunto de tubos conductores

que recubren las paredes refractarias, formando los paneles herméticos que constituyen el hogar. Desde el domo superior, los tubos de caída suministran el fluido en estado líquido al domo de lodos (cabezal principal), para de ahí repartirlo en los cabezales secundarios de distribución de cada una de las paredes de agua, iniciándose a partir de este punto, la ganancia térmica significativa y el ascenso del fluido gracias al flujo de circulación natural. Cada una de las paredes de agua, termina en salidas que conectan y descargan la mezcla generada de vapor-agua directamente dentro del domo superior. Las paredes de agua cumplen con las siguientes funciones básicas:

- Proteger el aislamiento de las paredes del hogar.
- Crear sello en la caldera.
- Absorber calor producto de la combustión realizada dentro del hogar.
- Suministrar el espacio para el desarrollo del flujo de circulación natural.

Los tubos se encuentran unidos mediante membranas, conformando una cámara hermética que evita la salida de gases al exterior y la eventual infiltración indebida de aire dentro del hogar. Las paredes de agua reciben también el nombre de pantallas de agua por la función que hacen de apantallar y proteger del calor las paredes de refractario. Ver figura 3.7.1 y 3.7.2.

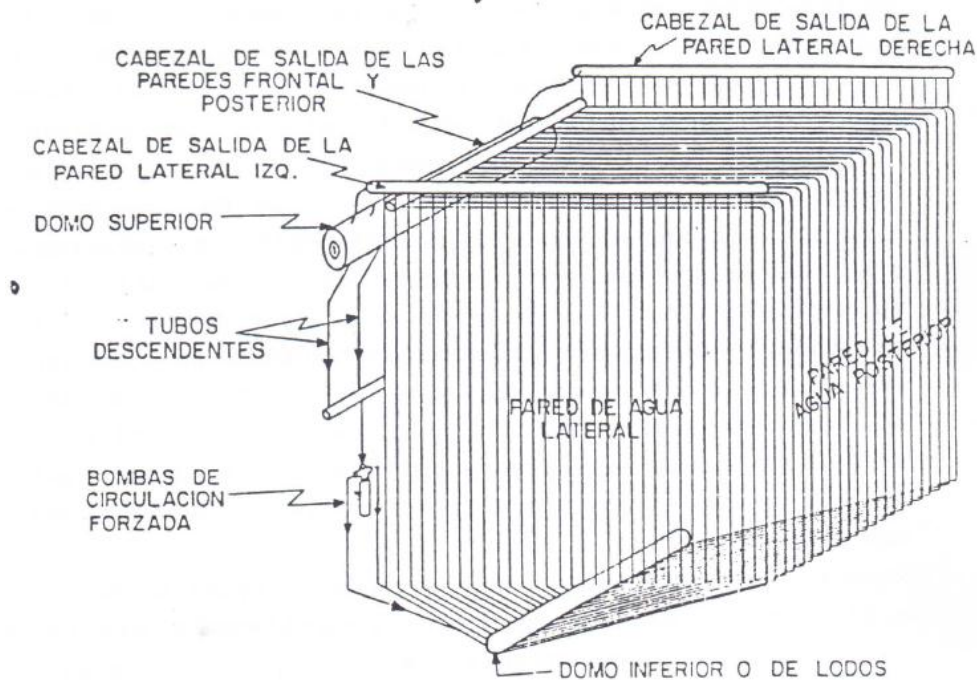


Figura 3.7.1 Disposición de las paredes de agua de una caldera acuotubular  
**Fuente:** CFE. "Centro de adiestramiento de operadores Ixtapantongo".





Figura 3.7.2 Paredes de agua de una caldera acuotubular  
**Fuente:** Cortesía Central Trinitaria

### **3.5.3 Tambor de lodos**

Se encuentra en la parte baja de la caldera, el tambor de lodos colecta las impurezas que se producen del tratamiento químico del agua. De estos tambores de lodos se extrae la purga. La purga es el líquido con impurezas que se extrae de la caldera para mantener baja la concentración de sólidos disueltos en el agua de la caldera. Se usan dos corrientes de purga, una es una purga continua de una cantidad fija de agua, la otra es intermitente.

### **3.5.4 Equipos recuperadores de calor:**

Son los que aprovechan el calor que va en los humos, para realizar una función determinada. Estos son: Economizador, sobrecalentador, recalentador, precalentador y calentador de aire.

#### **3.5.4.1 Economizador**

La función que desempeña este equipo es precalentar el agua de alimentación del generador de vapor antes de que sea introducida en el domo, recuperando parte del calor que todavía contienen los gases de la combustión al abandonar el generador de vapor, con esto se mejora su eficiencia.

El economizador se encuentra ubicado en el paso de gases a la salida del generador de vapor y está compuesto por dos bancos de elementos paralelos arreglados en filas horizontales, los bancos están dispuestos uno frente a otro, los tubos del economizador tienen aletas en forma de espiral para aumentar la superficie efectiva de calentamiento, tal como se muestra en la figura 3.8.

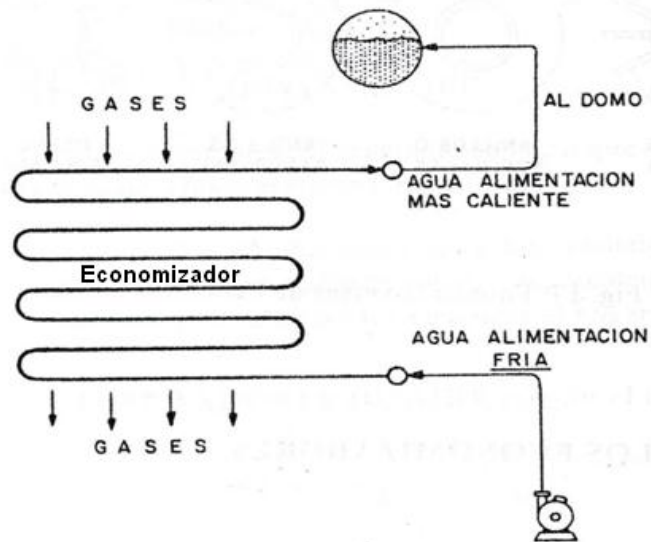


Figura 3.8 El Economizador

Fuente: Introducción a Centrales Termoeléctricas de la CFE.

### 3.5.4.2 Sobrecalentador

Este equipo recibe vapor saturado que sale del domo y lo sobrecalienta hasta la temperatura requerida por la turbina de vapor. Se muestra en la figura 3.9.

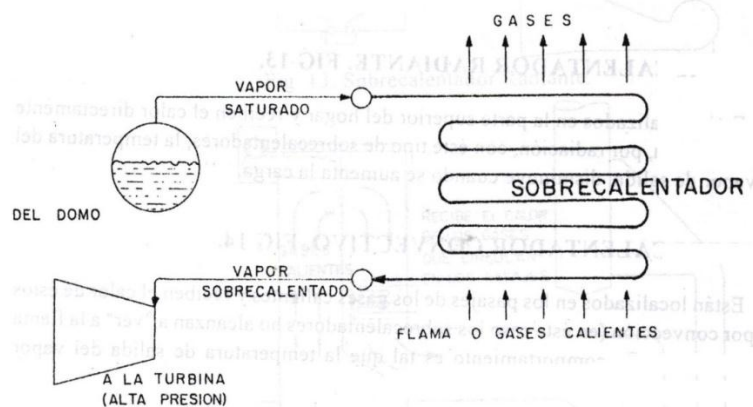


Figura 3.9 El Sobrecalentador

Fuente: Introducción a Centrales Termoeléctricas de la CFE.

El sobrecalentador es un equipo que ofrece una superficie de intercambio de calor por medio de la cual se eleva la temperatura del vapor saturado por encima de su punto de saturación. Este es el vapor que alimenta a la maquina motriz. Entre las principales razones para realizar este trabajo tenemos:

- Se aumenta la eficiencia total de la unidad.
- Se aumenta la ganancia termodinámica del vapor.
- Se obtiene un vapor más seco.

Una de las razones más importantes es que el vapor sobrecalentado tiene menos tendencia a condensarse en las últimas etapas de las turbinas. El sobrecalentador debe entregar el vapor a una temperatura uniforme dentro de un amplio rango de variaciones de carga.

### **3.5.4.3 Recalentador**

Es otro elemento o parte del generador de vapor que absorbe calor. El vapor que ya trabajó en la turbina, sale con una menor presión y temperatura, pero puede volverse a recalentar para seguir aprovechándose y trabajar en las etapas restantes o en otra turbina.

Las características y el comportamiento del recalentador son semejantes a las del sobrecalentador, pero el recalentador opera a una presión menor.

### **3.5.6 Atemperadores**

El sistema de atemperación por inyección, sprays, es un método para controlar la temperatura del vapor. Este método regula la temperatura de vapor, vaporizando agua con una temperatura más baja que la del vapor.

### **3.5.7 Hogar de la caldera**

Es el espacio donde se produce la combustión. Esta cámara está encerrada por tubos verticales que son paneles de agua, llamados también paredes de agua que le dan la forma y encierran la zona radiante de la caldera pues allí el calor es transmitido principalmente por radiación. La finalidad primordial del hogar es la de proporcionar espacio cerrado para que se produzca la combustión completa, esto es esencial para un buen funcionamiento en la caldera.

### **3.5.8 Cenicero**

Es el espacio que queda bajo la parrilla y que sirve para recibir las cenizas que caen de ésta. Los residuos acumulados deben retirarse periódicamente para no obstaculizar el paso de aire necesario para la combustión. Ver figura 3.10



Figura 3.10 Cenicero  
Fuente: Central Trinitaria. (Cortesía)

### **3.5.9 Puerta del cenicero**

Accesorio que se utiliza para realizar las acciones de limpieza del cenicero. Mediante esta puerta regulable se puede controlar también la entrada del aire primario al hogar.

### **3.5.10 Aislamiento y Refractario**

Son materiales que contienen el calor y se usan en el recubrimiento de hornos y calderas, son usados para estos fines ladrillos refractarios, cemento refractario, lana de vidrio recubierta con planchas metálicas. Estos materiales tienen como principal objetivo cubrir la caldera para evitar salida de gases calientes es decir pérdidas de calor al exterior.

### **3.5.11 Baffles y conductos de gases**

Los baffles dirigen los gases calientes convenientemente entre los pasos de tubos el número de veces (o cambios de dirección) necesarios para posibilitar una mayor absorción térmica por los tubos de caldera. Los baffles ayudan a mantener la velocidad de los gases, eliminan las bolsas y depósitos en zonas muertas y evitan pérdidas elevadas de tiro.

Los humos y gases calientes de la combustión siguen un camino establecido, en los cuales van entregando calor a determinadas zonas de la caldera. De esta manera, se aprovecha el calor entregado por estos para el calentamiento al agua y/o vapor.

### **3.5.12 Tapas de registro o puertas de inspección**

Son aberturas que permiten inspeccionar, limpiar y reparar la caldera. Existen dos tipos, dependiendo de su tamaño:

- Las puertas hombre
- Las tapas de registro.

La puerta hombre por su tamaño y dimensiones permite el paso de un hombre al interior de la caldera.

Las tapas de registro, por ser de menor tamaño, permiten sólo el paso de un brazo.

### **3.5.13 Quemadores**

Son los equipos de la caldera encargados de acondicionar y suministrar el combustible para mezclarlo con el aire de tal manera que se asegure el encendido rápido y la combustión completa.

En los quemadores de bunker o fuel oil, este debe ser atomizado para aumentar la superficie de contacto con el aire. La atomización se realiza generalmente con vapor pero se puede utilizar aire también. Aunque el vapor produce una muy buena atomización, presenta como desventaja que causa un mayor contenido de agua en los gases de combustión y disminuye el punto de rocío de los gases, además representa consumo de vapor que no se recupera.

Otra de las desventajas de la utilización de vapor para atomizar es la demanda de vapor, que en las grandes unidades producen significativas pérdidas térmicas por chimenea, salvo en aquellas que derivan mucho vapor a procesos con baja recuperación de condensados, en cuyo caso el consumo resulta relativamente despreciable.

Las figuras 3.11.1 y 3.11.2 muestran un quemador de combustible líquido circular que se utiliza en calderas.

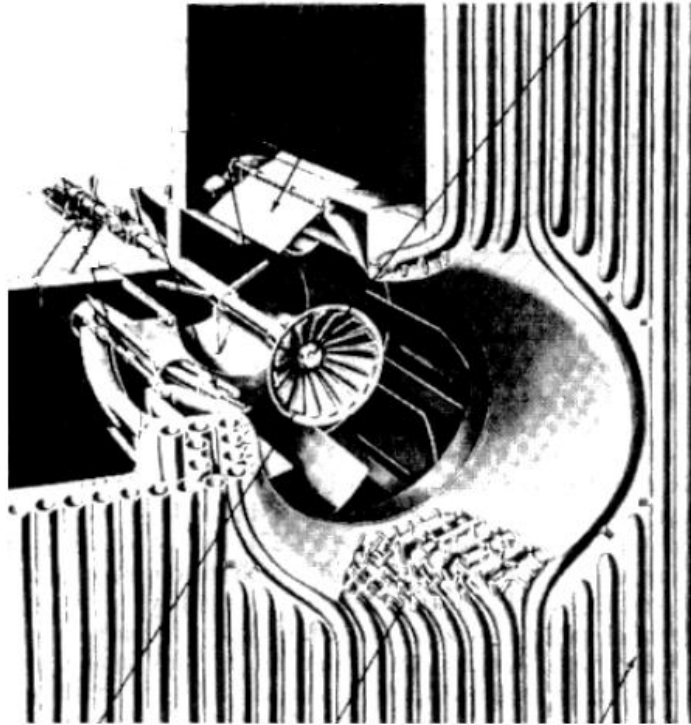


Figura 3.11.1 Presentación interior de un quemador de una caldera acuotubular.  
**Fuente:** Combustión – Unidad XII Dr. Ing. E. Brizuela – Ing. J. C. Loza.



Figura 3.11.2 Presentación exterior de un quemador de una caldera acuotubular.  
**Fuente:** Central Trinitaria. (Cortesía)

### 3.5.14 Caja de aire

Es el recinto que cubre a los quemadores y deja pasar el aire a los:

- **Registros:** Son láminas colocadas en forma solapada (semejante a las persianas de una ventana circular) encargadas de regular el aire de combustión, al estar abiertas dejan pasar el aire y al estar cerrada forman un cilindro que no deja pasar el aire hacia su interior, en donde se encuentra la lanza del quemador. (Figura 3.12.1 y 3.12.2).

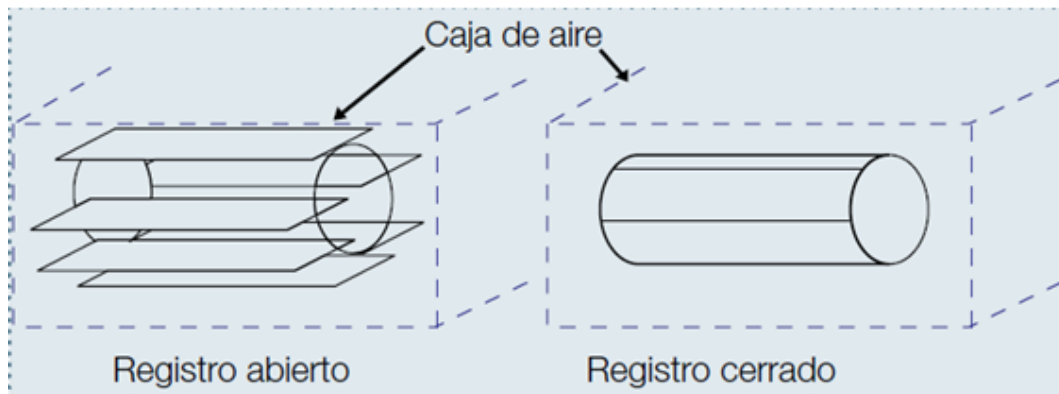


Figura 3.12.1 Esquema de una caja de aire y registros

Fuente: ES | Electricidad básica. Por Ing. Carlos R López. Capítulo 6 Electrosector.



Figura 3.12.2 Vista de caja de aire y registros

Fuente: Central Trinitaria (Cortesía)

Para tener una buena combustión es necesario producir una mezcla íntima aire/combustible. Para lograr esta mezcla el aire entra desde la caja

de aire a la zona del quemador a través de un registro, que es realidad un ducto circular segmentado en compuertas o persianas las cuales están conectadas a un eje accionado desde el exterior por una manija con la cual se puede graduar la posición o abertura de las compuertas.

La forma de estas compuertas, arqueadas, le imprime velocidad y le da un sentido de rotación al aire formando una especie de turbulencia lo que propicia una mezcla homogénea aire/combustible.

### 3.5.15 Ventiladores

Los ventiladores de tiro forzado toman aire de la atmósfera y lo llevan a través de los conductos y precalentadores al denominado cajón de aire que rodea el hogar de la caldera para luego ingresarlo al hogar por medio de los registros o dampers de los quemadores. Este flujo de aire se requiere para la combustión en el generador de vapor.

Generalmente se usa un ventilador centrífugo que toma el aire de la atmósfera a 30 °C y lo succiona para descargarlo en un ducto cuadrado de metal a cierta presión en mm ca (milímetro de columna de agua) para que llegue al hogar. Ver figura 3.13. Estos son los llamados Ventilador de tiro forzado (**VTF**):

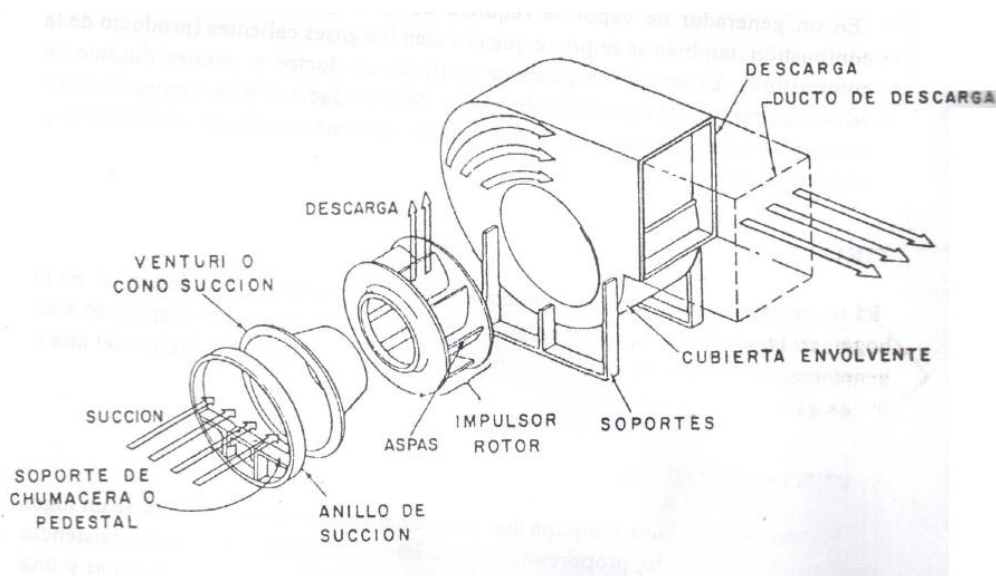


Figura 3.13 Ventilador de tiro forzado.

Fuente: Introducción a Centrales Termoeléctricas de la CFE.

### 3.5.16 Calentador de aire por vapor

Aunque lo ideal sería recuperar la mayor cantidad posible de calor de los gases, esto tampoco es recomendable, pues como ya se vio, la presencia de azufre en ellos y muy baja temperatura puede causar serios problemas de corrosión en el calentador. Para evitar esto se instala un precalentador de aire, el cual es un intercambiador generalmente con vapor de baja presión que se condensa y retorna al sistema como agua de alimentación. La temperatura normal del aire entrando al calentador de aire debe estar entre 60°C y 80°C.



El propósito de estos calentadores es incrementar la temperatura del aire de entrada al precalentador de aire regenerativo, aumentando así la temperatura promedio del metal del lado frío (entrada de aire y salida de gases).

Lo anterior reduce la formación de ácido sulfúrico que provoca la corrosión del lado frío del precalentador regenerativo cuando se utilizan combustibles que contienen azufre (carbón y aceite combustible). Ver figuras 3.14.1 y 3.14.2.

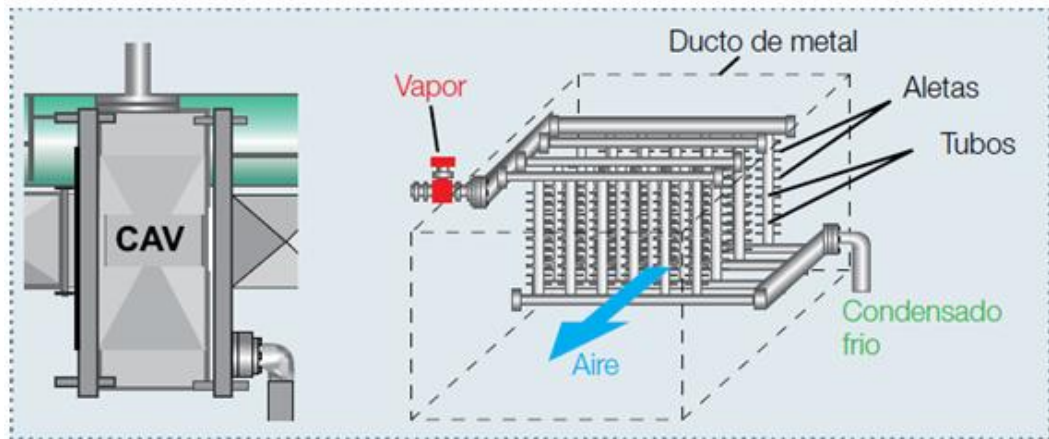


Figura 3.14.1 Esquema del calentador aire por vapor.

Fuente: ES | Electricidad básica. Por Ing. Carlos R López. Capítulo 6 Electrosector

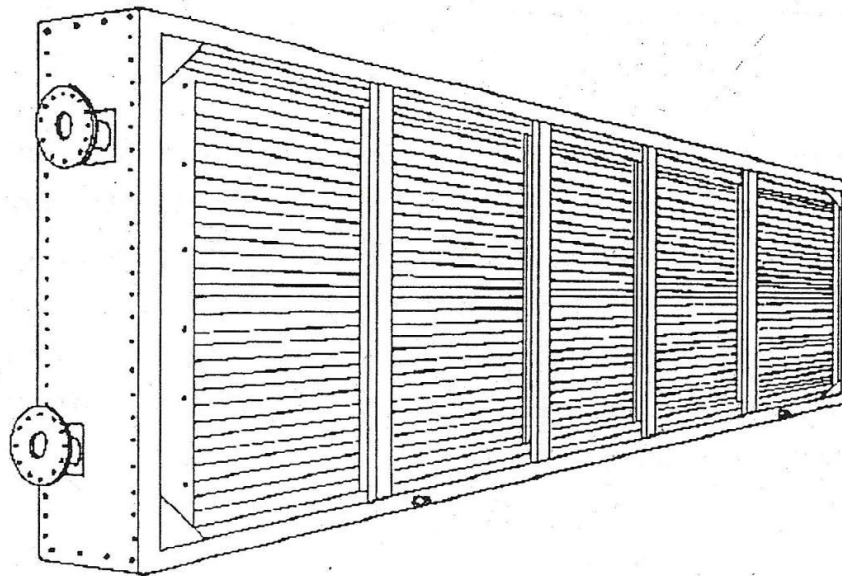


Figura 3.14.2 Calentador aire por vapor

Fuente: Fomperoza, Ramiro "Sistema para encendido, calentamiento y presurización de un generador de vapor para una central termoeléctrica".

### 3.5.17 Calentador de aire regenerativo

Es un intercambiador de calor aire-gases, circular, esta formado por un tambor conteniendo paquetes de laminillas (llamados canastas), que rota a una velocidad angular ( $\omega$ ) de 1 a 3 rpm, debido a un motor acoplado a una caja reductora de engranajes, este rotor o eje tiene acopiadas unas canastas. Una mitad de este conjunto se calienta con los gases mientras la otra mitad, previamente calentada, cede el calor al aire que entra. Ver figuras 3.15.1 y 3.15.2.

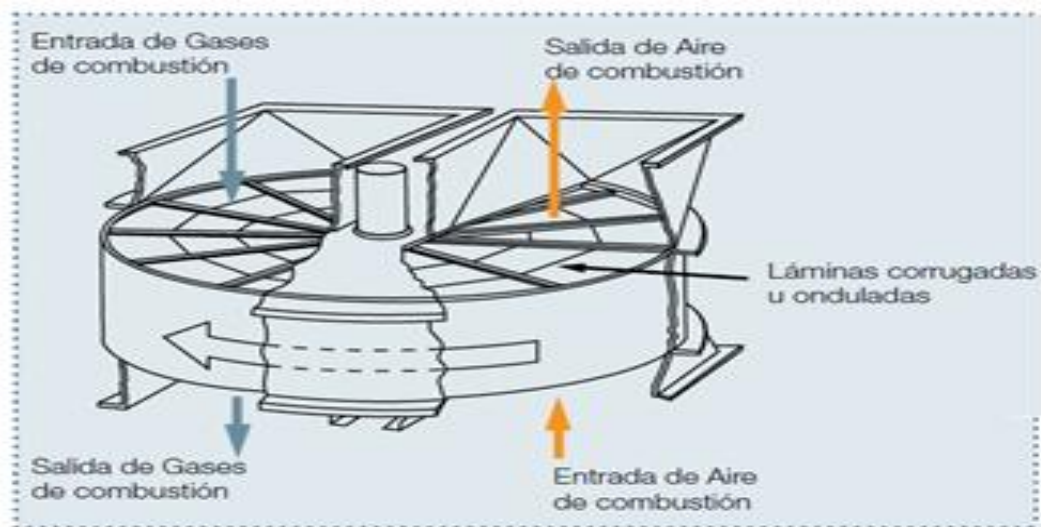


Figura 3.15.1 Esquema de calentador aire regenerativo

Fuente: ES | Electricidad básica. Por Ing. Carlos R López. Capítulo 6 Electrosector

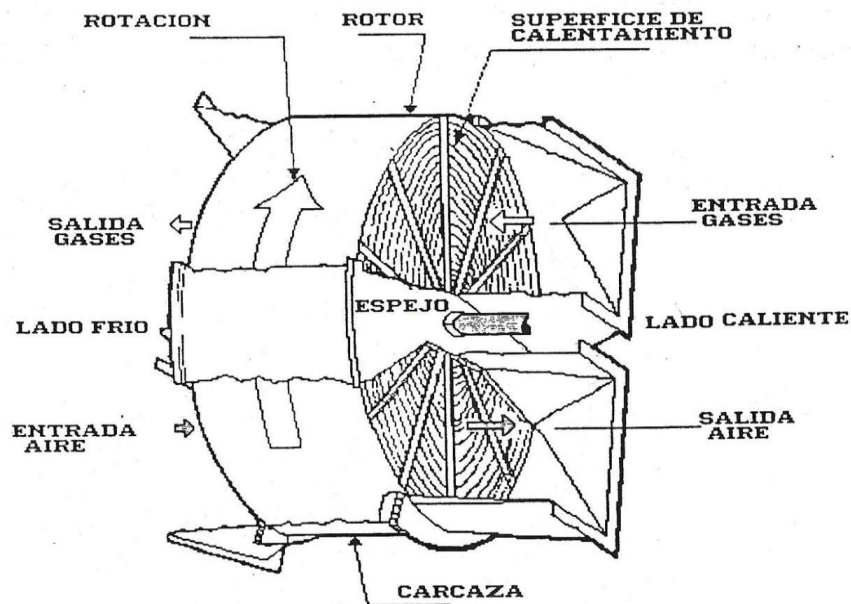


Figura 3.15.2 Calentador aire regenerativo (car).

Fuente: "Sistema para encendido, calentamiento y presurización de un generador de vapor para una central termoeléctrica". Ramiro Rafael Fomperozza Guerrero

### 3.5.18 Bomba de agua de alimentación a la caldera.

Es un equipo auxiliar de caldera. Es la encargada de mantener la presión de operación dentro de la caldera. El tipo de bombas generalmente utilizado en las instalaciones de calderas industriales es la centrífuga, de varias etapas como se puede ver en la figura 3.16.

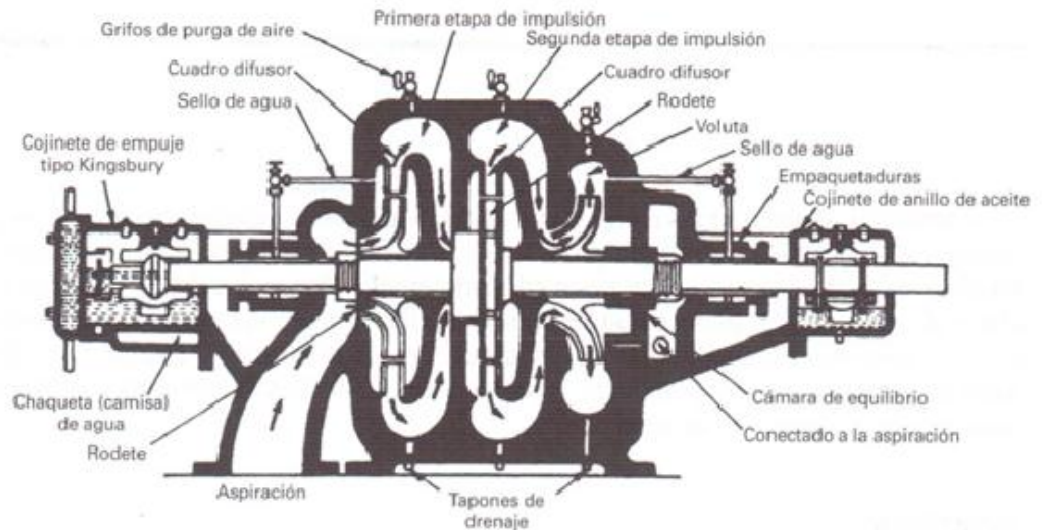


Figura 3.16 Esquema de bomba de alimentación de calderas. Centrífugas multietapa.

Fuente: Manual de Calderas de Anthony Kohan

### 3.5.19 Equipo de tiro

Según varios autores, concuerdan que la descarga a la corriente de aire en la caldera, es fundamental para la combustión. También se lo conoce como tiro a esta descarga.

- **Tiro forzado:** En este sistema se extrae aire del exterior (ambiente) hacia la caldera utilizando enormes ventiladores extractores.
- **Tiro inducido:** Absorbe los gases de la cámara de combustión (el hogar de la caldera) y expulsa hacia la chimenea, pero el inconveniente que tienen es que el ventilador que extrae el aire de la cámara se encuentra trabajando en una zona conflictiva por la elevada temperatura, trabaja en una zona donde los gases corrosivos y los sólidos como la ceniza, que pueden llegar a estropear las paletas de los ventiladores.
- **Tiro equilibrado:** Se utiliza los dos elementos anteriores, el tiro forzado y el tiro inducido, con esta conseguimos no presurizar la cámara de combustión. Este tiro es manejado en calderas muy largas, ya que hay pérdidas de carga considerables (pérdidas de presión) si sólo colocásemos tiro forzado aumentaríamos la presión de la cámara de combustión y si sólo colocásemos tiro inducido crearíamos mucho vacío, que provocaría deformaciones de la cámara de combustión.

### **3.5.20 Chimenea**

Conducto por donde salen los gases de combustión. Debe tener una altura mínima sujeta a la reglamentación local. Se rige por las condiciones ambientales, edificaciones cercanas y dirección del viento.

La chimenea es empleada para los siguientes propósitos:

- Evacuar los gases de combustión de la caldera, después de que han cedido la mayor parte posible de calor aprovechado por los equipos disponibles.
- Producir un tiro o presión estática para ayudar a la evacuación de los gases de combustión.
- Controlar el nivel de contaminación ambiental circundante, mediante la descarga directa de partículas en la parte alta de la atmosfera.

### **3.5.21 Ventilador de aire de sellos**

De acuerdo al tipo de caldera (presión positiva) cualquier apertura en el hogar puede provocar fuga de gases.

Sin embargo, existen ciertas aperturas que el diseño del generador de vapor contempla, por ejemplo:

- Mirillas de observación (sellos y refrigeración),
- Juntas de sopladores de hollín,
- Quemadores de fuel oil,
- Compuertas lado gases precalentadores regenerativos

Debido a esto, se requiere contar con un ventilador de aire de sello que succiona de la línea igualadora en la descarga de los ventiladores de tiro forzado y suministra una presión mayor a la del hogar.

### **3.5.22 Ventilador para detectores de flama**

Su función es proporcionar enfriamiento continuo a los detectores de llama (ópticos). Este enfriamiento continuo debe ser proporcionado mientras el hogar tenga más de 90°C, ya que de lo contrario los detectores pueden sufrir daño.

### **3.5.23 Ventilador recirculador de gases**

La recirculación de gases es la operación mediante la cual se ejerce el control de la temperatura del vapor sobrecalentado y recalentado. Los gases procedentes de la salida del economizador son introducidos en la parte inferior del hogar mediante un ventilador.

### **3.5.24 Calentadores de combustible**

El combustóleo es un combustible pesado de elevada viscosidad a temperatura ambiente, por lo que para facilitar su manejo y una óptima combustión es necesario que tenga la temperatura adecuada, esto se lleva a cabo en los calentadores de combustóleo donde se utiliza la energía del vapor

saturado proveniente del generador vapor para incrementar su temperatura y obtener las características de manejo y a su vez de atomización en quemadores.

Los calentadores de combustóleo pueden ser del tipo carcasa abierta, en el caso que se encuentren dentro del tanque de almacenamiento o del tipo carcasa cerrada cuando se encuentran fuera, en estos últimos generalmente el vapor circula por el interior de los tubos en “U” y el combustóleo fluye por el exterior en un solo paso.

Para mantener la temperatura del combustible en el valor requerido, cada calentador de combustible cuenta con un control de temperatura que regula la cantidad de vapor que entra a calentador mediante una válvula automática. El punto de ajuste de la temperatura requerida puede establecerse localmente o desde la sala de control mediante una estación de control.

### 3.6 Clasificación de calderas acuotubulares para centrales térmicas

Existen varias clasificaciones pero para nuestro análisis vamos a revisar las usadas para generación eléctrica. Las calderas para centrales de generación se clasifican básicamente atendiendo tres características:

- Por su presión: en subcrítica y supercrítica (hipercrítica)
- Por el tipo de circulación de agua: circulación natural o circulación forzada
- Por el combustible usado: sólido, líquido o gaseoso

### 3.7 Calderas acuotubulares

En estas calderas, según el autor (Navarro, 2010) comenta que, el agua que fluye por el interior de los tubos forman un flujo encerrado a través del calderín que constituye la superficie de intercambio de calor de la caldera y los gases de combustión circulan por los exteriores de los tubos.

En la siguiente figura 3.17 se muestra una caldera acuotubular para una central de generación.



Figura 3.17 Vista de una caldera acuotubular  
Fuente: Central Trinitaria (Cortesía)

Estas calderas constan de un hogar configurado por tubos de agua, tubos y refractario, en el cual se produce la combustión del combustible y constituyendo la zona de radiación de la caldera.

Desde dicho hogar, los gases calientes resultantes de la combustión son conducidos a través del circuito de la caldera, configurado este por paneles de tubos y constituyendo la zona de convección de la caldera. Finalmente, los gases son enviados a la atmósfera por medio de la chimenea.

Cuando se requieren presiones superiores a 20.5 bares o 300 Psi se hace indispensable la utilización de las calderas acuatubulares aun cuando pueden operar desde 120 Psi en adelante.

En la siguiente figura tenemos un esquema de una caldera acuatubular de vapor saturado y sobrecalentado mostrando sus diferentes secciones (ver figura 3.18). El agua líquida entra al economizador (1), donde se calienta hasta una temperatura próxima a la de saturación (2), se introduce en el calderín y desciende por los tubos de riego (3-3') hasta el colector inferior, distribuyéndose hacia los tubos vaporizadores, donde se forman las burbujas de vapor (4-5) que a su vez se separan en el calderín (6). El vapor saturado (7) puede calentarse por encima de su temperatura de saturación en el sobrecalentador (8).

La circulación del agua por los tubos de bajada (riegos) y de subida (vaporizadores) puede ser por convección natural, debido a la diferencia de densidades (izquierda), o forzada mediante una bomba (derecha).

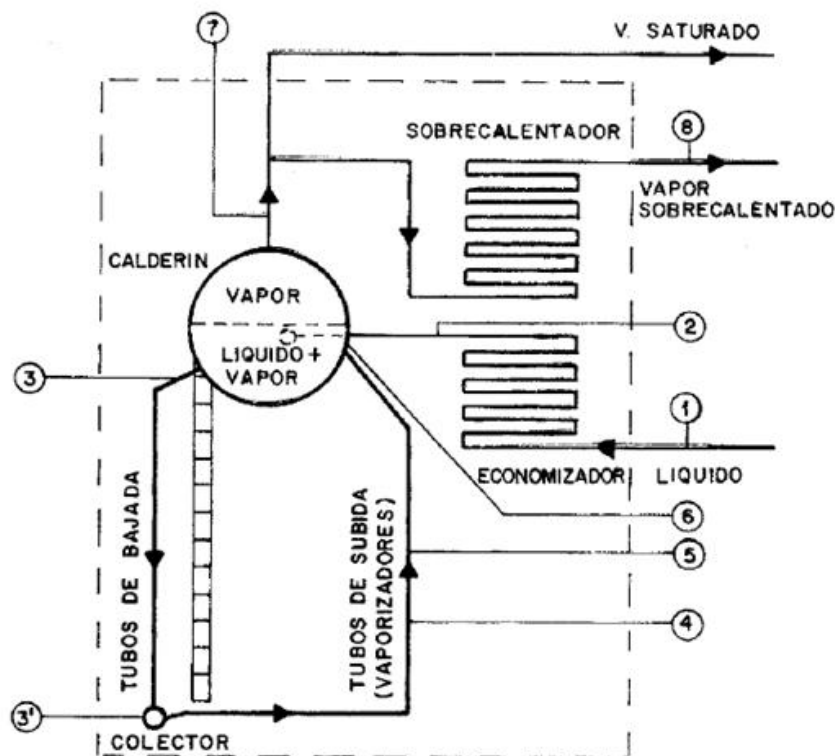


Figura 3.18 Esquema de una caldera acuatubular

Fuente: Rodríguez, J. Calderas de vapor acuatubulares. Adobe Acrobat Document

Los generadores de vapor de calderas acuatubulares tienen la parte activa constituida de un conjunto de tubos en paralelo y verticales, que se les

conoce como evaporadores y que forman también parte de las paredes del hogar o cámara de combustión y que hacen los apoyos en las extremidades superior e inferior respectivamente de los colectores de agua y del vapor.

### **3.8 Características de la Caldera de Tubos de Agua**

- Las elevadas capacidades y presiones de la caldera de tubos de agua han hecho posible los modernos generadores de vapor en las centrales térmicas.
- Puede obtenerse mayor capacidad en la producción, incrementando el número de tubos, independientemente del diámetro del domo.
- El calderín no está expuesto al calor.

Las calderas requieren el uso de combustibles líquidos, sólidos y gaseosos como medio de generación de calor. En el presente estudio se escogió un combustible líquido, el fuel-oil por ser este un producto derivado del petróleo que precisa un menor refinamiento para utilizarse como combustible para calderas de vapor y su costo es económico, es más fácil de transportar y de almacenar.

### **3.9 Generador de vapor con circulación natural.**

En los generadores de vapor circulación natural, el agua que proviene normalmente de un gran colector superior, denominado también “cuerpo cilíndrico”. Desciende por los tubos de caída no recalentada, alimenta los conductores de distribuciones inferiores derramándose por lo tanto en los tubos evaporadores, la mezcla de agua y vapor que así se forma sale del cuerpo cilíndrico favoreciendo la separación del vapor y del agua, los vapores pasan eventualmente al sobrecalentador y de aquí a la turbina en tanto el agua retorna en círculo. El movimiento del agua se asegura de la diferencia de peso específico entre el agua que baja y la mezcla agua-vapor que sube.

Si la diferencia de peso específico no es suficiente para garantizar la necesaria velocidad de circulación, esta se debe activar con bombas opuestas. La circulación natural del agua se muestra en la siguiente figura 3.19.

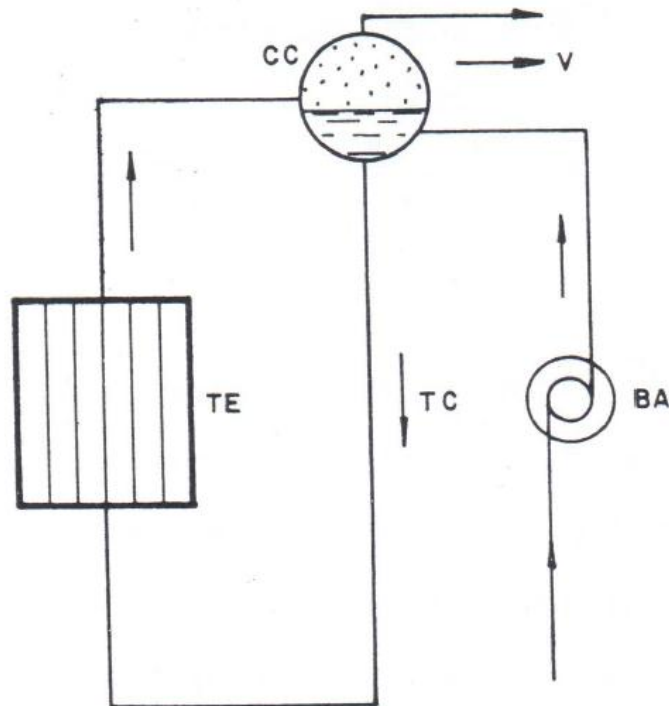


Figura 3.19 Esquema de la circulación del agua en forma natural.  
**Fuente:** Gilberto Enriquez Harper. Elementos de centrales electricas I

- CC: Colector superior, cuerpo cilindrico o domo
- TC: Tubos de caída.
- TE: Tubos evaporadores.
- BA: Bomba de alimentacion.
- V: Vapor para utilizacion

### 3.10 Generador de vapor con circulacion forzada.

Cuando la diferencia del peso especifico entre el agua no fuera suficiente como para garantizar la velocidad de circulacion necesaria, entonces esta velocidad se activa con bombas de circulacion. Como se muestra en la figura 3.20.



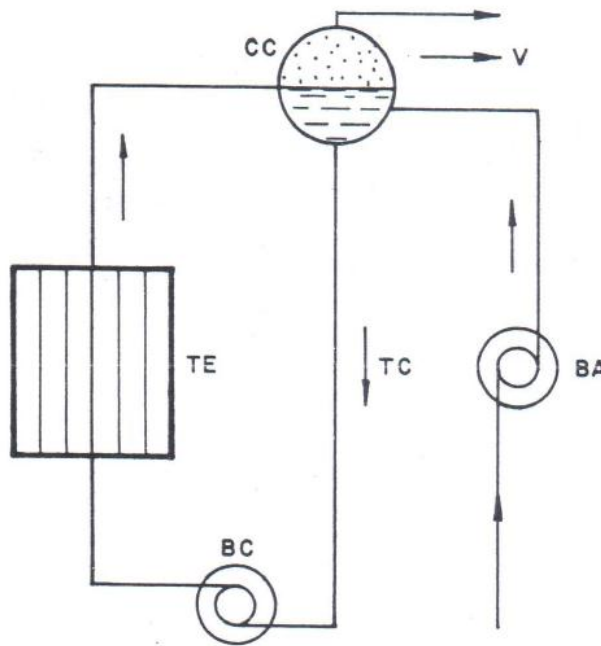


Figura 3.20 Esquema de la circulación del agua con bomba.  
**Fuente:** Gilberto Enriquez Harper. Elementos de centrales electricas I

Este tipo de generador de vapor se emplea especialmente cuando la presión de operación es elevada, generalmente del orden de  $180\text{Kg/cm}^2$ , de hecho, con el aumento de la presión disminuye rápidamente la relación entre la densidad del agua y la del vapor, y la circulación natural en todos los tubos evaporadores resulta más difícil. Es ahora necesario el uso de una bomba apta para garantizar una circulación activa del agua en la caldera también durante las variaciones bruscas de la carga.

#### Calderas Supercriticas:

Las calderas supercríticas son las que trabajan por encima de la presión crítica del diagrama agua vapor, o sea  $225\text{ bar}$ , y a una temperatura de trabajo por encima de la temperatura crítica del agua de  $374.2^\circ\text{C}$ . La presión crítica es la presión a la cual el agua y el vapor tienen la misma densidad, mientras la temperatura crítica es la temperatura por encima de la cual el agua no puede existir como líquido, no importa cual sea la presión. Esto significa que el agua a la temperatura de  $374.2^\circ\text{C}$  tendrá también la presión crítica de  $225\text{ bar}$  absolutos. No hay calor latente de vaporización por encima de la presión crítica, ya que el agua y el vapor tienen la misma densidad. No hay calderín para separar el agua del vapor.<sup>2</sup>

### **3.14 Circuito Agua-Vapor.**

#### Agua.

El agua proveniente de las bombas de agua de alimentación, entra al economizador y eleva su temperatura, con el calor que llevan los gases de combustión, hasta un valor ligeramente inferior a la de saturación correspondiente a la presión de trabajo del domo. El agua de alimentación sale

<sup>2</sup> Kohan, Anthony L. Manual de calderas. McGraw- Hill, 2000.

del economizador, para llegar al domo y distribuirse las paredes de agua del hogar. El agua circula por las paredes del hogar y se evapora parcialmente absorbiendo parte del calor generado en la cámara de combustión (hogar).

La mezcla agua-vapor regresa al domo para que el vapor producido se separe de la mezcla, y el agua se retorne junto con el agua de alimentación a los cabezales de distribución de las paredes de agua del hogar.

El Perímetro donde fluye el agua o mezcla agua-vapor, se lo aprecia en:  
(Ver figura 3.21)

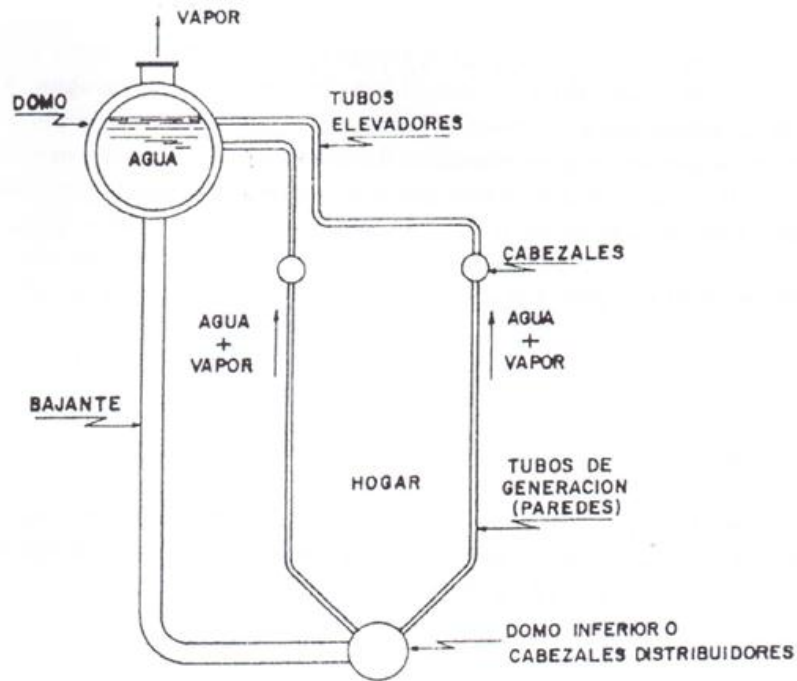


Figura 3.21 Circuito de circulación agua-vapor.

**Fuente:** Introducción a Centrales, disponible en

<http://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/4962/2/7833.doc>

➤ Tubos de Generación

En esta etapa se produce caldeoamiento del agua y una porción de esta se transforma en vapor. Los tubos dentro de una caldera son previamente diseñados, uno junto a otro para establecer las paredes del hogar.

➤ Tubos Elevadores

Son tubos de unión entre los tubos de generación y el domo. En su interior llevan una mezcla de agua-vapor derivada en los tubos de generación, con destino al domo. Los tubos elevadores no están expuestos al calor.

➤ Domo

Es un depósito cilíndrico horizontal con definitivo nivel de agua. Aquí se realiza el apartamiento del vapor procedente y el agua. El vapor surge por la parte superior con destino a otros equipos del generador de vapor. El domo no está expuesto al calor.

➤ Bajantes

Son conductos de mayor diámetro que recorren por el exterior del hogar, por lo tanto no están expuestas al calor. Contiene agua que se dirige hacia abajo, ello se denominan bajantes.

➤ Domo inferior

Es un recipiente cilíndrico horizontal localizado en la parte inferior del hogar. Su diámetro es menor al del domo superior. Sirve como cabezal distribuidor y es el enlace entre los bajantes y los tubos de generación. Todos los tubos de generación parten del domo inferior. El domo inferior no está expuesto al calor. Cuando las calderas no tienen domo inferior, se encuentran con varios cabezales distribuidores.

➤ Cabezales

Según la definición conceptual de un documento especializado, disponible en: <http://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/4962/2/7833.doc.>, indica que son depósitos que sirven como repartidores o descargas comunes de un grupo de tubos. Acoplan a los tubos de generación con los bajantes o con los elevadores, no están expuestos al calor.<sup>3</sup>

Cuando se está provocando vapor, la superficie de un tubo que contiene agua deberá fluir uniformemente para impedir que las partes sometidas al calor soporten un calentamiento grande y lleguen a fallar. En las calderas actuales se dispone de otros medios para producir un movimiento óptimo del agua y fluidez del mismo vapor a través de los tubos y depósitos.

Vapor de agua.

El vapor de agua producido se separa en el domo y sale del mismo, pasando primero por un sistema de purificación y secado que elimina al máximo la humedad que se arrastra en la separación. El vapor, casi seco, entra a los tubos del sobrecalentador donde aumenta su temperatura hasta el valor especificado por las condiciones de operación de la turbina. El calor que se transfiere al vapor, proviene de los gases de combustión que circulan por el exterior de los tubos del sobrecalentador. El vapor sobrecalentado sale del generador de vapor, hacia la turbina, donde será utilizado para generar energía eléctrica.

Como parte del circuito de vapor de agua se tiene el vapor recalentado, este vapor ha sido expandido en las primeras etapas de la turbina, sale por una extracción de la misma y entra al recalentador, para elevar su temperatura con calor recuperado de los gases de combustión. El vapor recalentado sale con una temperatura similar a la del vapor sobrecalentado, para regresar a la turbina y generar energía eléctrica, mejorando la eficiencia del ciclo. Cabe mencionar que uno de los medios para controlar la temperatura del vapor sobrecalentado y recalentado, es el agua de atemperación que se suministra al sobrecalentador y al recalentador, respectivamente.

### **3.15 Sistemas de Calderas**

#### **3.15.1 Sistema de combustible**

Este sistema mantiene la alimentación de combustible adecuada para la combustión que se realiza en el hogar de la caldera. Comprende tuberías, filtros, bombas de combustible, calentadores de bunker y electroválvulas.

---

<sup>3</sup> Introducción a Centrales Termoeléctricas. CFE. México

En nuestro país el combustible usado actualmente para la combustión en calderas acuatubulares es el fuel-oil No. 4. Los fuel-oil son viscosos, y para ser quemados necesitan ser atomizados o pulverizados usualmente con vapor.

La introducción de Fuel Oil en la caldera para su combustión se realiza mediante un equipo de bombeo y calentamiento, que tiene la finalidad de proporcionar al combustible la presión y temperatura adecuada para ser quemado en el hogar por medio de los quemadores.

Normalmente este equipo es doble, es decir hay una bomba y un calentador en reserva. La bomba en funcionamiento aspira el combustible de los tanques de almacenamiento en donde se calienta el fuel Oil por medio de calentadores de succión para un transporte adecuado.

En la impulsión de las bombas y antes de entrar el fuel oil en los calentadores se regula a una presión adecuada por medio de una válvula controladora de presión, de manera que se retorna a los tanques de almacenamiento el caudal sobrante. Seguidamente el combustible pasa por el interior de los tubos de los calentadores donde se calienta por medio de vapor saturado hasta los 105°C necesarios para introducirlos en la caldera. Ver figura 3.22.

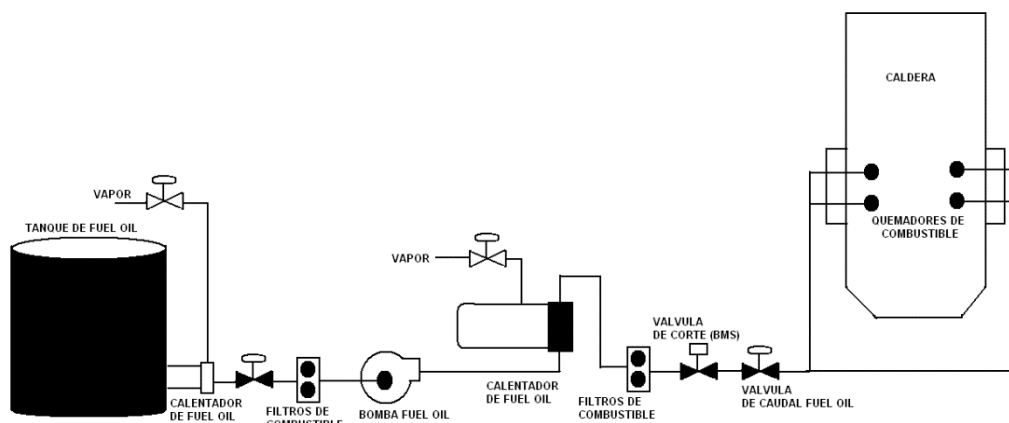


Figura 3.22 Sistema de combustible

Fuente: El Autor.

### 3.15.2 Sistema de aire de combustión

Este sistema es el elemento primordial para mantener una combustión. Debe ser regulado de acuerdo al consumo de vapor y en proporción adecuada al combustible, para mantener la flama con una combustión no contaminante y económica. Comprende el ventilador de tiro, cajón de aire, registros de aire, calentadores, modulador para la entrada de aire.

El aire para la combustión se introduce al sistema por medio de los ventiladores de tipo forzado (VTF), circula por el calentador de aire con vapor, y llega al precalentador regenerativo, para extraer parte del calor que llevan los gases de combustión, calor que se recupera para el sistema al precalentar el aire que se envía al hogar para quemado del combustible. Ver figura 3.23.

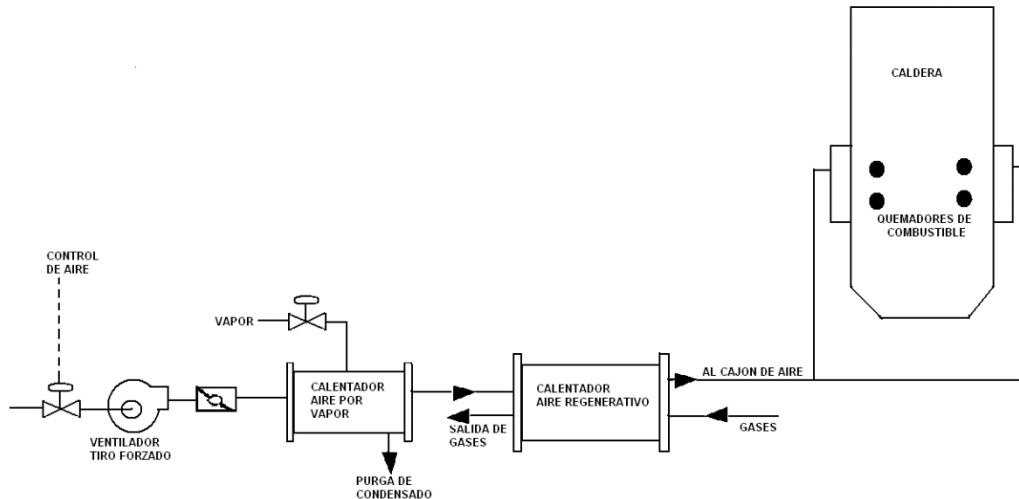


Figura 3.23 Sistema de aire de combustión  
Fuente: El Autor.

### 3.15.3 Sistema de tratamiento de agua

El agua de alimentación para calderas debe llevar tratamiento previo antes de entrar al equipo, para esta finalidad es necesario un circuito de tratamiento de agua, con el fin de realizar tratamientos de filtración, ablandamiento, desalinización, desmineralización y en general una purificación del fluido por medio de diferentes procesos de tipo químico. Muchas plantas usan agua bruta procedente de ríos, lagos o esteros como agua de aportación de caldera, la cual es tratada externamente con los procesos anteriormente indicados.

### 3.15.4 Sistema de precalentamiento de agua alimentación a la caldera

El agua de alimentación a las calderas debe estar lo más caliente posible para evitar daños internos en la caldera al introducirle agua "fría", y además por economía, para gastar menos combustible al elevar la temperatura del agua para convertirla en vapor. Cuando más caliente se le introduzca el agua, más aumenta la capacidad de la caldera.

### 3.15.5 Sistema de gases de combustión

Los gases de combustión se forman con los productos que generaran las reacciones entre los componentes del combustible (C, H, S, N, etc.) y el oxígeno (O<sub>2</sub>) del aire que se mezcla con el combustible. Estos gases transfieren la gran parte del calor, generado durante la combustión, al agua que circula por las paredes del hogar. Cabe mencionar que la mayor parte del calor transferido es por radiación.

Los gases de combustión salen del hogar y atraviesan los bancos de tubos del sobrecalentador y del recalentador, donde intercambian su calor con el vapor de agua que circula por los tubos. Después de pasar por estos equipos, los gases siguen a través del economizador, donde el agua de alimentación

aumenta su temperatura recuperando parte del calor que llevan estos gases. Ver figura 3.24.

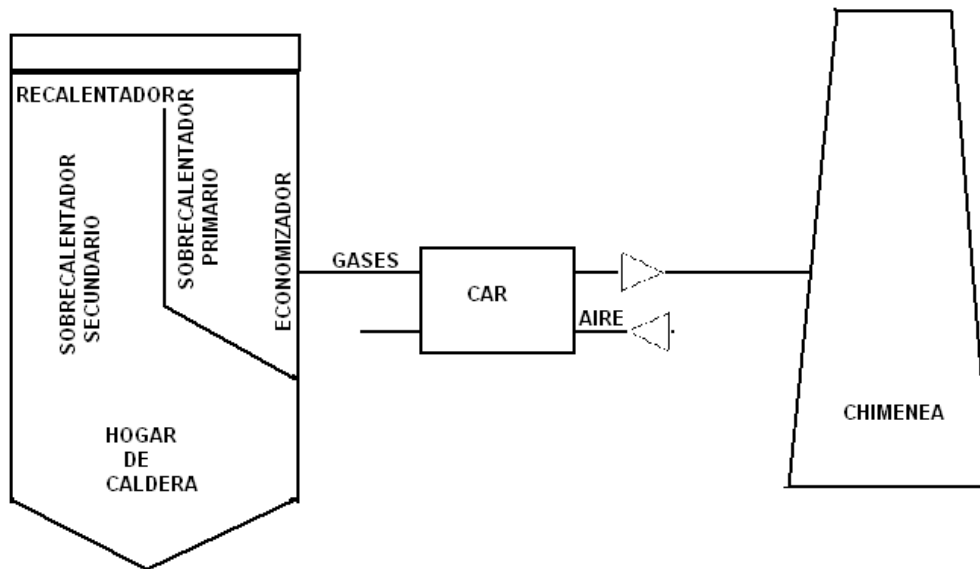


Figura 3.24 Recorrido de los gases en una caldera  
**Fuente:** El Autor

Los productos de combustión continúan su trayectoria hacia la salida, línea, pasando por el precalentador de aire y cediendo por última vez una fracción más del calor que todavía llevan, el cual se recupera al precalentar el aire de combustión.

Finalmente, los gases de combustión, con el calor que conservan después de pasar por el precalentador de aire, salen hacia la chimenea, para ser arrojadas al medio ambiente. En este último paso, se tiene la mayor cantidad de pérdidas de calor que disminuye la eficiencia del sistema.

### 3.15.6 Sistema de soplores mecánicos de hollín

La mayoría de calderas están equipadas con soplores de hollín, los cuales sirven para mantener la superficie exterior de los tubos limpia y libre de material que pudiera afectar la transferencia de calor. Se utiliza vapor para el soplado del hollín y la frecuencia de la operación depende del combustible usado.

Existen dos tipos de soplores de hollín; los fijos o estacionarios y los retráctiles. Ver figura 3.25.

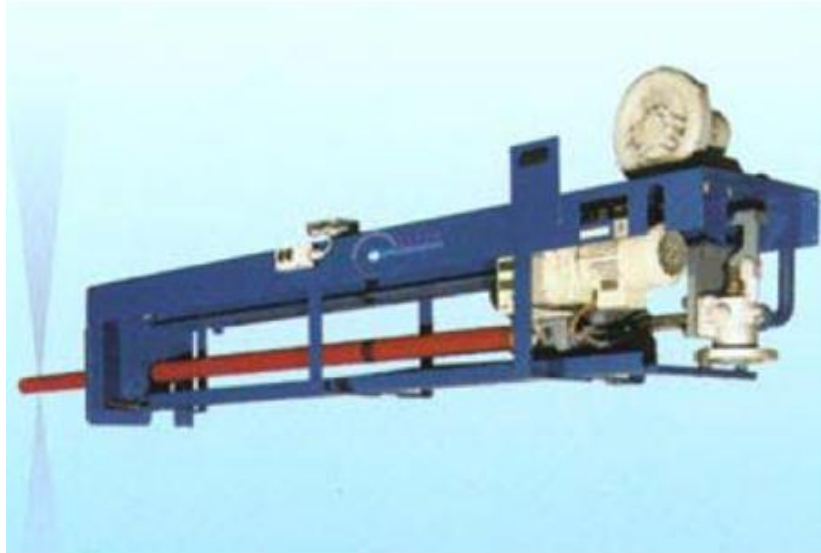


Figura 3.25 Soplador retráctil.

**Fuente:** Rueda, Lourdes. "Modernización del sistema de control de cenizas, escorias y sopladores de hollín de la central térmica de Velilla"

Durante el funcionamiento de la caldera, se depositan sobre las tuberías ceniza y hollín, estas sustancias son aislantes térmicos que reducen la transferencia de calor, el rendimiento de la caldera disminuye a medida que crece el espesor de la incrustación, los sopladores de hollín están instalados en la caldera y situados de manera que todas las superficies de transferencia de calor sometidas a la acumulación de hollín puedan limpiarse con chorros de vapor y eliminar el hollín de la caldera, por medio de la chimenea.

El hollín se acumula sobre las partes expuestas a los gases de la combustión. Como el hollín tiene un alto poder aislante del calor, se hace necesario evitar que se adhiera a los tubos de la caldera. Esto se consigue limpiándolos continuamente con sopladores de hollín.

Los sopladores de hollín están instalados permanentemente en la caldera y permiten que aquellas partes de suficiente calefacción sometidas a la acumulación de hollín puedan limpiarse con chorros de vapor, aire o una mezcla de aire - vapor.

Los sopladores de hollín son cañerías de vapor instaladas convenientemente entre los haces de tubos, van agujereadas y tienen movimiento pudiendo dárseles la dirección requerida; como su nombre lo indica, sirven para limpiar de hollín los tubos. Ver figura 3.26.

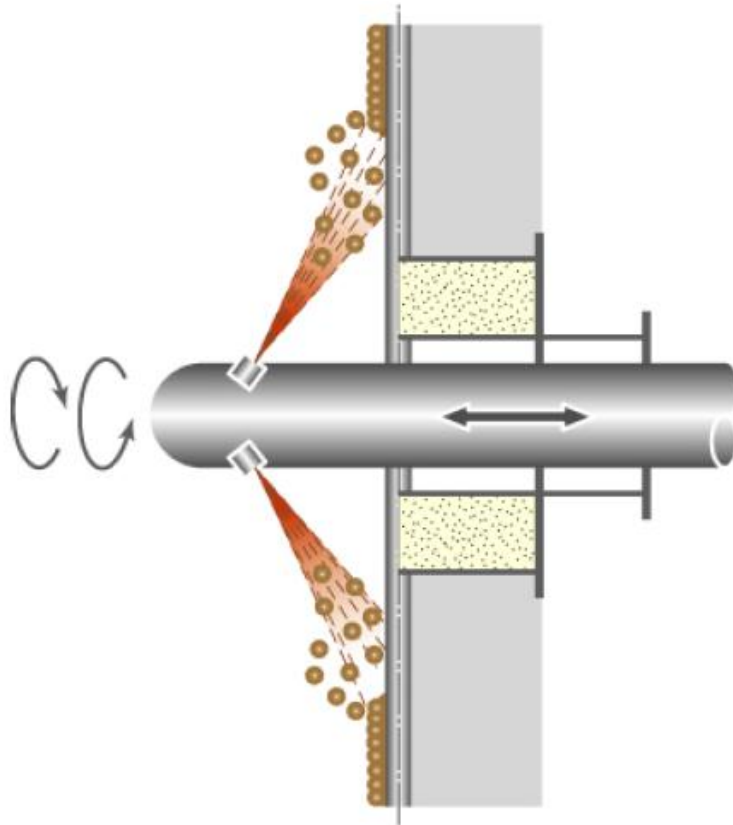


Figura 3.26 Soplador de pared.

**Fuente:** Rueda, Lourdes. "Modernización del sistema de control de cenizas, escorias y sopladores de hollín de la central térmica de Velilla"

Requerimientos en la operación del soplado de hollín:

Se requiere vigilancia de los siguientes parámetros:

- Vigilancia de temperatura del vapor
- Vigilancia de la intensidad de carga superior por soplador; Se hace un seguimiento de la intensidad para evitar que el motor del soplador siga funcionando si el soplador se ha quedado parado. En tal caso se manda al soplador retroceder.
- Vigilancia de la intensidad de carga inferior por soplador; Para detectar el mal funcionamiento o rotura del mismo.
- Vigilancia de tiempo de funcionamiento de los sopladores; Es otro método para detectar el mal funcionamiento de los sopladores, puesto que se sabe el tiempo que debe estar el soplador en marcha.



# CAPITULO 4

## SEGURIDAD EN CALDERAS

### 4.1 Introducción.

Según (Bonilla, 2009) señala que, la operación de un generador de vapor se debe considerar el daño y pérdida de vidas que podrían resultar en caso de un accidente, así como los aspectos económicos que lo acompañan. Uno de los riesgos principales en los dispositivos a presión tal como los generadores de vapor, es la liberación brusca de presión y los daños que esta puede ocasionar.

El principal riesgo que presentan los generadores de vapor son las explosiones, las cuales se pueden clasificar en:

- Explosiones físicas por rotura de las partes a presión: Se produce por la vaporización instantánea y la expansión brusca del agua contenida en el generador, como efecto de la rotura producida en un elemento sometido a presión.
- Explosión química en el hogar (parte interna de la caldera): Producida por la combustión instantánea de los vapores del combustible acumulado en el hogar.

Para evitar cualquier riesgo inminente y que ponga en peligro la integridad física del equipo y de los operarios se recomienda tomar en cuenta los siguientes puntos:

#### Puntos de seguridad.

- Seguridad por falta de agua.
- Seguridad por exceso de presión de vapor.
- Seguridad por falla en la flama.

### 4.2 Desarrollo de los Estándares de Seguridad

Que la tecnología sea cada vez más habitual en nuestra vida diaria hace que se produzcan cada vez más accidentes por fallos en esa tecnología. Esto hace que sea necesario establecer en los sistemas unos mínimos requerimientos de seguridad para la protección de:

- ❖ Vidas humanas
- ❖ Equipos y productos
- ❖ Medio ambiente

### 4.3 Los sistemas de Seguridad

Los Sistemas de Seguridades están diseñados para proteger a las personas, equipos y entorno ante condiciones que puedan resultar peligrosas.

En estos casos deben actuar inmediatamente llevando la planta o el equipo a una posición segura.

Con frecuencia el diseñador de un Sistema de Seguridades cae en el error de no considerar al Sistema como algo "global". Se fija demasiado en una parte, por ejemplo el tipo de hardware a utilizar, y descuida otras partes creando lamentables cuellos de botella y puntos débiles. Ver figura 4.1.

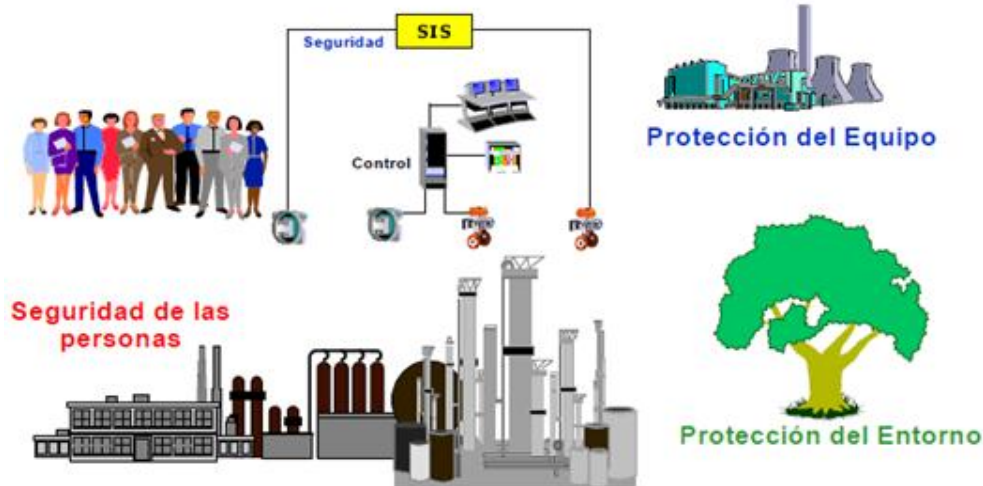


Figura 4.1 Objetivos del sistema de seguridad.

Fuente: Curso isa control y seguridades de calderas de vapor.

#### 4.4 BMS para calderas industriales (Burner Management System).

El BMS protege contra la entrada peligrosa de combustible en la caldera. El sistema supervisa continuamente todos los enclavamientos, las disposiciones de las válvulas y el estado de las llamas. Si hay alguna condición no tolerada el sistema avisa audible y visualmente que elemento causa el problema y desconecta el sistema de Fuel Oil asociado o dispara la caldera dependiendo del tipo de situación producida.

#### 4.5 Requerimientos funcionales

(Villajulca, 2009) señala al respecto, que la situación del sistema de seguridad de la caldera y el manejo de quemadores es la de vigilar la caldera y poner o quitar de servicio de una forma segura los quemadores.

De acuerdo con todas las señales procedentes de la instrumentación de campo (transmisores de presión, nivel, temperatura, finales de carrera, etc.) y, si es el caso, de las procedentes de otros sistemas o equipos auxiliares, el BMS se delegará de establecer las acciones ineludibles (cierre de válvulas de combustible, etc.) para impedir sobrepasar los límites de funcionamiento considerados aceptables para la caldera o el proceso, llevando a la caldera a una situación de seguridad desde la cual se podrá reiniciar su puesta en servicio.

Además de la supervisión continua del estado general de la caldera, el BMS implementa una forma segura, todas las sucesiones de encendido y apagado de los quemadores e ignitores.

De forma general, se podrían distinguir las siguientes secuencias:

#### **4.5.1 Disparos de Caldera.**

Cualquier situación de riesgo para la caldera o el proceso provocará un disparo de la misma. Dicho disparo provocará el cierre de todas las válvulas de corte de combustible, así como la desenergización del relé MFT.

#### **4.5.2 Barrido o Purga de Caldera.**

(Villajulca, 2009) Vuelve a señalar que, luego de cualquier disparo de caldera se debe cumplir un barrido del hogar y de todos sus conductos asociados, con el objetivo de evitar que una posible atmósfera rica en combustible, debida a pequeñas fugas o a in-quemados, pueda producir una detonación en el caso de un encendido.

#### **4.5.3 Rearme de Caldera.**

Una vez que el barrido ha sido finalizado y no hay ninguna condición de disparo, se ha de rearmar el relé MFT. Esta acción produce el *reset* de todas las memorias de disparo, tanto a nivel software (PLC) como hardware (relé MFT), lo que permitirá el encendido del quemador. El relé MFT es un relé de seguridad que es manejado por el PLC además de ser desenergizado directamente por los pulsadores de disparo de emergencia. La tensión a todas las válvulas de corte combustible se establece a través de sus contactos de forma que si el relé MFT está desenergizado no es posible la apertura de dichas válvulas.

#### **4.5.4 Encendido y apagado de los quemadores e ignitores.**

Estas secuencias se encargarán de la puesta en servicio de los quemadores, asegurando que todos los permisivos necesarios para ello se van cumpliendo adecuadamente.

Asimismo, se encargará de la vigilancia permanente del estado de los quemadores, de forma que provocará el disparo de los mismos ante una anomalía en las señales de proceso (pérdida de llama, alta/baja presión de combustible etc.), cortando inmediatamente la aportación de combustible al hogar.

#### **4.5.5 Barrido de caldera**

Después de cada disparo de caldera se debe utilizar el barrido con el VTF para remover del hogar cualquier resto de combustible gaseoso o suspendido y reemplazarlo por aire.

Permisivos

El operador comprobará que se satisfacen todos los permisivos de arranque del

VTF y lo arrancará. Para poder realizar el barrido de caldera se deberán cumplir las siguientes condiciones:

- a) Caldera disparada.
- b) Caudal aire combustión no bajo/bajo.
- c) Todas las válvulas de corte de combustible cerradas.
- d) VTF en marcha.
- e) Presión hogar no alta/alta.
- f) No disparo de emergencia.
- g) Alabes VTF no forzados a posición completamente abierta (tiro natural).
- h) No bloqueo de álabes del VTF. Situación que se produce ante un disparo de caldera debido a un muy bajo caudal de aire de combustión o a una muy baja relación combustible-aire.
- i) No llama detectada.

En este momento la indicación de iniciar barrido caldera se iluminará hasta que el operador presione el pulsador de inicio de barrido, iniciándose entonces la secuencia de barrido.

#### **4.5.6 Secuencia automática**

Una vez presionado el pulsador de inicio del barrido, se dará orden de situar los álabes del VTF en posición de barrido.

Para que la secuencia de barrido se lleve a cabo con éxito, se deben cumplir las siguientes condiciones:

- a) Permisos de barrido satisfechos.
- b) Caudal de aire  $\geq 25$  % de plena carga.
- c) Registros de aire de los quemadores abiertos.

Si estas condiciones se cumplen, se iluminará la indicación de barrido de caldera en progreso durante un periodo de 300 seg. Si durante la secuencia automática se pierde algún permisivo, será necesario repetir la secuencia de barrido.

#### **4.5.7 Rearme**

Una vez finalizado el barrido de caldera y si no existe ninguna condición de disparo se iluminará la indicación de rearmar caldera y el operador deberá accionar el pulsador correspondiente con el objeto de rearmar el relé MFT y la lógica de disparo de caldera. Una vez rearmada la caldera la indicación de caldera disparada desaparece, quedando la caldera en disposición de encendido.

#### **4.5.8 Disparos de caldera**

(Villajulca, 2009) Comenta al respecto, cualquier disparo de caldera provocará el cierre de todas las válvulas de corte de combustible así como la desenergización del relé MFT.

*Disparos*

Cualquiera de las siguientes causas provocará un disparo de caldera:

- a) Relación aire/combustible muy bajo.
- b) Nivel del calderín muy bajo.
- c) Presión del vapor del calderín muy alta.
- d) Presión del hogar muy alta.

- e) Presión del aire de instrumentación muy baja.
- f) Fallo de alimentación del sistema de control.
- g) VTF no en marcha.
- h) Caudal aire combustión muy bajo.
- i) Disparo de emergencia.
- j) Pérdida de todas las llamas.
- k) Última válvula de combustible cerrada.
- l) Alto nivel calderín
- m) Bajo nivel calderín
- n) calentador de aire no en marcha

#### Ignitor

El Ignitor se pondrá en servicio cuando sea requerido para el encendido del quemador al actuar sobre el pulsador de encendido del quemador, o cuando sea requerido para la purga del combustible líquido.

#### **4.5.9 Detector de Llama**

El autor (Vidal, 2006) señala al respecto, que un detector de llama es una celda fotoeléctrica instalada en la puerta del fogón, la cual al censar una señal radiante (llama del quemador) remite una señal eléctrica al controlador del quemador. En caso de no detectar llama, la señal eléctrica al controlador será bloqueada lo que evitará el flujo de combustible hacia el quemador.

#### **4.6 Seguridad en el combustible**

La (CONAE, 2007) señala al respecto, que los combustibles almacenan gran cantidad de energía, pueden encenderse fácil y rápidamente; por ello es esencial que:

- ❖ Se observe rigurosamente todos los procedimientos de seguridad y que los mismos estén por escrito y siempre a la mano.
- ❖ Los dispositivos de seguridad se mantendrán en buen estado y listos para entrar en operación en cualquier momento.

#### **4.7 Válvulas de seguridad**

Según información teórica de la empresa (Todocalderas, 2011) señala que, es el dispositivo de seguridad más trascendental sobre una caldera y puede ser la última defensa contra una explosión por sobrepresión. Otras definiciones sobre este importante dispositivo ayudaran a diferenciar los tipos que hay disponibles:

- ❖ Un mecanismo de alivio de presión esta delineado para aliviar la presión o abrir para evitar una subida interna de presión de una vasija o recipiente cerrado con presión excesiva sobre la admisible de trabajo.
- ❖ Una válvula de alivio de presión esta operada por la presión interior que tiene un ascenso graduado proporcional al incremento de presión y se utiliza principalmente para impedir sobrepresión en el servicio de líquidos.
- ❖ Una válvula de seguridad es un dispositivo de alivio de presión actuado por la presión ajustada pero representado por una operación de apertura

rápida, para operar y reducir la presión inmediatamente, al dejar escapar vapor de un recipiente cerrado.

- ❖ Una válvula de alivio de presión guiada por presión es un mecanismo de alivio donde el dispositivo principal está actuado y regulado por un disparador auxiliar auto-operado de la válvula de alivio de presión (Kohan, 2000).

#### 4.8 Construcción de la válvula de seguridad

Según información disponible en la página: <http://www.todocalderas.com.ar/articulo/19/valvulas-de-seguridad-para-calderas.html>, una válvula de seguridad debe estar correctamente construida, su construcción debe alcanzar las especificaciones del código ASME, registrada y aprobada siendo su funcionamiento de disparo por muelle directo cargado a resorte, y adecuadamente marcada o calibrada tanto en posición como en caudal o capacidad de evacuación y equipada con un a palanca de prueba. El ajuste de presión debe corresponder bien a la presión máxima admisible para la que se diseñó la caldera o, en calderas viejas, la máxima presión permitida por la ley del estado. La capacidad de la válvula de seguridad debería ser, al menos, igual al vapor máximo que puede generarse por la caldera. Una válvula de seguridad según el código ASME tiene la siguiente información inscrita en el cuerpo de la válvula o placa nominativa:

Nombre del fabricante o marca registrada comercial.

Tipo de fabricante o número de diseño.

Ver figura 4.2.

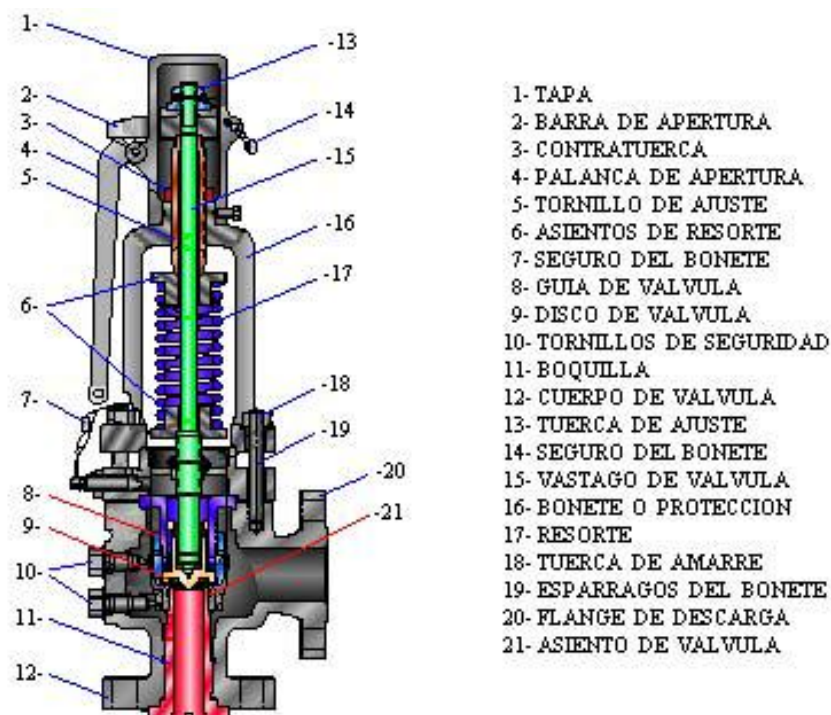


Figura 4.2 Válvula de seguridad.

**Fuente:** Vidal, Víctor. "Inspección y mantenimiento de calderas marinas auxiliares"

Las válvulas de seguridad son utilizadas para aliviar el exceso de presión del vapor de la caldera. La capacidad total de todas las válvulas de seguridad de

una caldera debe ser suficiente para aliviar el caudal de vapor que teóricamente puede producir la caldera.

Las calderas con sobrecalentador y recalentador están en general equipadas con los siguientes dispositivos de seguridad, por orden creciente de presión de ajuste:

Válvulas de seguridad del sobrecalentador, en la salida de vapor del sobrecalentador, colocada antes de la válvula de incomunicación con la red general de vapor. Ver figura 4.3.

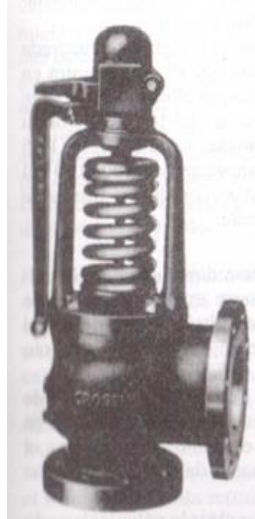


Figura 4.3 Válvula de seguridad para vapor sobrecalentado.  
**Fuente:** Kohan, Anthony. Manual de calderas.

Válvulas de seguridad del recalentador, en la salida de vapor del recalentador, colocada antes de la válvula de incomunicación con la red de vapor.

Una primera válvula de seguridad del tambor, en el tambor de la caldera.

Una segunda válvula de seguridad del tambor, en el tambor de la caldera.

#### **4.9 Expansiones y dilataciones en caldera**

Se puede producir graves daños en la caldera y sus componentes si no se les permite la dilatación prevista.

Durante la inspección previa la puesta en marcha, deberá comprobarse de que nada dificulta su libre movimiento en la dirección prescrita.

Quitar todo el andamiaje, arriostrado y tirantes provisionales, así como todos los residuos en las juntas de dilatación y juntas hidráulicas de la tolva de cenizas o tanques de escorias. Si la caldera esta soportada por arriba, comprobar si todos los tirantes de suspensión están aguantando carga.

Las turbinas de vapor, conductos de humos y conductos de aire de combustión y de aire que estén soportados independientemente no deben imponer ninguna carga a la caldera.

## 4.10 Vigilancia

Antes de poner en marcha deben colocarse unos indicadores de referencia. Estos dispositivos deben indicar con claridad la posición en caliente y frío de la caldera con relación a otros componentes o la estructura de acero fija. Se debe establecer la dirección y magnitud de la dilatación con el fin de dejar el espacio adecuado al instalar estos indicadores, estos no dificultan la dilatación. En algunos casos se puede determinar la dilatación mediante la simple toma de mediciones a partir de punto de referencia conocidos. Los soportes y guías deslizantes, deben permitir la dilatación prescrita a partir de los soportes fijos.

Durante el funcionamiento inicial de la caldera, debe observarse la dilatación continuamente. Este periodo debe comprender el funcionamiento a plena presión y carga y también el funcionamiento con reducción de la presión. Debe averiguarse las causas de cualquier desvío respecto a la dilatación prevista y tomarse las medidas correctoras oportunas, la existencia de tubos agrietados, asientos de tubos con fugas, tambores agrietados y envoltura desgarrada suele ser debida a una dilatación obstaculizada.

## 4.11 Formación del trabajador

Las personas encargadas de vigilar, supervisar, operar y mantener cualquier caldera, deberán ser instruidas adecuadamente en el funcionamiento de la misma, e informadas de los peligros que pueden ocasionar una falsa maniobra, una mala operación o un mal mantenimiento.

Siempre que  $P \times V > 50$ , donde P es la presión efectiva máxima de servicio de la caldera, en Kg/cm<sup>2</sup>, y V es el volumen, en m<sup>3</sup>, de agua a nivel medio, para calderas con un nivel definido, o el volumen de todas las partes a presión, para calderas sin nivel definido, el operador de la caldera deberá tener obligatoriamente, tal como lo prescribe el reglamento de Aparatos a Presión, el Carné de conductor de Caldera Industrial, expedido por el ministerio de industria.

Si  $P \times V$  fuese menor o igual a 50, el operador deberá ser instruido adecuadamente por el fabricante, instalador o usuario si dispone de técnico competente.<sup>4</sup>

## 4.12 Procedimientos contra accidentes

“Un accidente es cualquier acontecimiento imprevisto que interrumpe o interfiere el proceso ordenado de una actividad, las lesiones y los accidentes son resultados de actos inseguros o fallas técnicas. Los actos inseguros dependen de las personas y los fallos técnicos dependen de los equipos, es decir un incorrecto mantenimiento de los equipos o un mal diseño de las máquinas, equipos o instalaciones respectivamente. Para evitar los accidentes debemos seguir procedimientos y ciertas instrucciones para cada trabajo o actividad a realizar.”

1. Capacitación y entrenamiento del personal involucrado.

---

<sup>4</sup> Floría, Pedro. “Manual para el técnico de prevención de riesgos laborales”



2. Simulacros y evaluar las condiciones operativas de la planta termoeléctrica.
3. Realizar trabajos con la debida autorización.
4. Utilizar protecciones y resguardos en las máquinas e instalaciones.
5. 44Aviso y señalización de las condiciones inseguras o zonas de peligro.
6. Utilizar el equipo y herramienta necesaria y adecuada.
7. No usar ropa de trabajo inadecuada, demasiado holgada, con manchas de grasa, con cinturones o partes colgantes.
8. Mantener orden y limpieza en el área de trabajo.
9. Evitar el almacenamiento incorrecto de materiales, bultos depositados en los pasillos que obstruyen las salidas de emergencia.
10. Reducir los niveles de ruido excesivos.
11. Mantener la iluminación adecuada en el área de trabajo.
12. Evitar la existencia de los materiales combustibles o inflamables, cerca de focos de calor.
13. No sobrepasar la capacidad de carga de los equipos elevadores o de vehículos.
14. Planificar inspecciones de áreas y puestos de trabajo con el fin de detectar condiciones inseguras o actos inseguros que puedan derivar en daños a las personas, a las instalaciones, o al producto.

# CAPITULO 5

## FUNDAMENTOS DE CONTROL EN CALDERAS

### 5.1 Sistema de control

Un sistema de control es el que gobierna la respuesta en procesos de planta, sin que el operador intervenga directamente sobre sus elementos de salida, este solo manipula valores de consigna (valores deseados) y el sistema de control se encarga de que las salidas sean deseadas mediante la manipulación de los accionamientos, es decir, compara el valor de una variable a controlar con un valor de referencia y cuando existe una desviación, efectúa una corrección sin que exista la intervención humana.

El objetivo de un sistema de control automático es ajustar la variable manipulada para mantener la variable regulada en el valor deseado en un punto de referencia aun en presencia de perturbaciones.

El control nos ayuda a lo siguiente:

- ❖ Previene riesgos para el personal de la planta
- ❖ Protege al medio ambiente, previniendo las emisiones y minimizando derrames
- ❖ Previene daños a los equipos
- ❖ Mantiene la calidad del producto
- ❖ Mantiene la rata de producción al mínimo costo.

Un sistema o lazo de control elemental se puede ver en un diagrama de bloques de la figura 5.1 y consiste de un controlador automático, un actuador, un proceso y un sensor (elemento de medición). El controlador detecta la señal de error, que es por lo general de potencia muy baja y la amplifica al nivel deseado, la salida del controlador alimenta al actuador que comúnmente es una servo válvula que produce una entrada a la planta de acuerdo con la señal de control, a fin de que la señal de salida de la planta se aproxime a la señal de entrada de referencia.

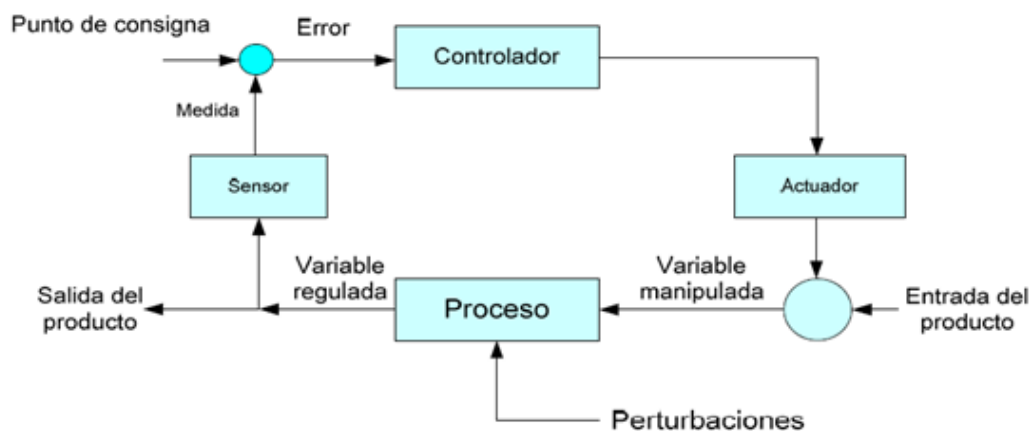


Figura 5.1 Lazo de control

**Fuente;** Botia, Javier. "Simulación y cuantificación del ahorro energético de una caldera pirotubular bajo control on- off".

## 5.2 Conceptos y definiciones.

- Variable controlada o a controlar (A).- es la condición o cantidad que se mide para su control (presión, temperatura, nivel, flujo, etc.).
- Medio controlado (B).- es la materia o sustancia de la cual la variable controlada es una condición o característica (agua, vapor, combustible, etc.).
- Variable manipulada (C).- es la condición o cantidad variada por el elemento final de control (E), de tal forma que afecte el valor de la variable controlada. Por lo general es flujo (flujo de agua, flujo de vapor, flujo de combustible, etc.).
- Agente de control (D).- es la sustancia o materia del cual la variable manipulada es una condición o característica. Es la energía o materia utilizada para cambiar las condiciones del proceso.
- Elemento final de control (E).- es el dispositivo en un sistema de control que produce directamente cambios en la variable manipulada.

Los conceptos mencionados se ilustran en la figura 5.2.

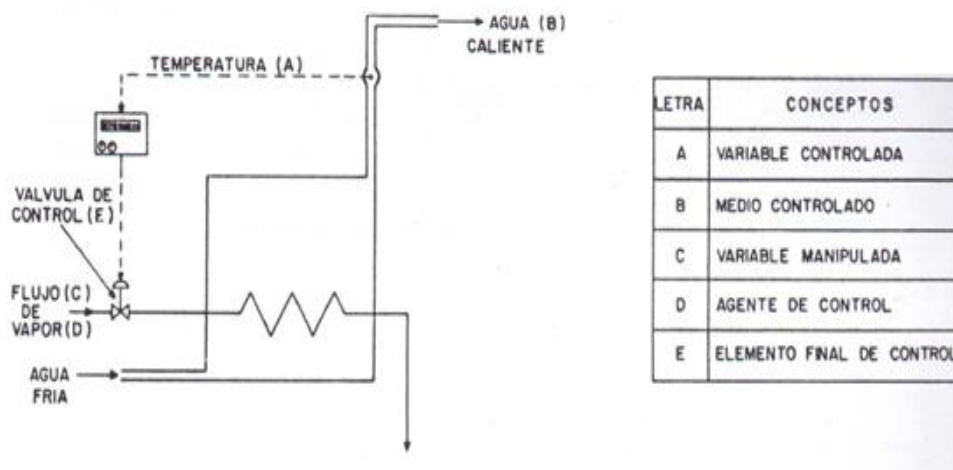


Figura 5.2 Elementos y variables involucradas en un proceso controlado.

Fuente: CFE. Centro de capacitación Celaya. Fundamentos de teoría de control.

## 5.3 Modos de control

Un control automático compara el valor efectivo de salida de una planta o proceso con el valor deseado, determina la desviación o error y produce una señal de control que reducirá a cero o a un valor cercano a éste. La forma en que el control automático produce la señal de corrección (en magnitud, rapidez, exactitud, etc.) recibe el nombre de modo o acción de control, o dicho de otra manera, es la forma de control para eliminar o reducir la desviación de la variable controlada. El modo de control se selecciona dependiendo del proceso y del grado de exactitud que se requiera para eliminar esta desviación.

Los diferentes modos de control utilizados para controlar procesos son:

- De dos posiciones (si – no)
- Proporcional P
- Integral I
- Proporcional más Integral PI

- |   |     |
|---|-----|
| 5. Proporcional más Derivativo              | PD  |
| 6. Proporcional más Integral más Derivativo | PID |

### 5.3.1 Modo de control de dos posiciones (si – no).

En un modo de control de dos posiciones, el elemento final de control tiene sólo dos posiciones fijas, que en muchos casos son simplemente conectado o desconectado, lo que vendría a hacer que tomara su posición máxima o mínima respectivamente, o viceversa. Los controles de dos posiciones son generalmente dispositivos eléctricos, aunque también los hay de tipo mecánico y neumático.

### 5.3.2 Modo de control proporcional: P

En el modo proporcional hay una relación lineal continua, entre el valor de la variable controlada y la posición del elemento final de control. En otras palabras, el elemento final de control adopta siempre la misma posición para una determinada desviación.

### 5.3.3 Modo de control integral: I

En este modo de control, llamado también **flotante**, la posición del elemento final de control es cambiada a una velocidad o razón proporcional al valor del error o desviación. Es decir, mientras más grande es el error, más rápido se mueve el elemento final de control.

A diferencia del modo de control proporcional, el integral responde a la magnitud y duración del error, ante un disturbio, por lo que el elemento final de control continua corrigiendo mientras persista dicho error y, una vez eliminado, el elemento final de control tendrá una nueva posición para la nueva carga.

El factor de importancia primordial, en relación con el modo proporcional, es que, mientras exista desviación, la corrección a la posición del elemento final de control continua. Así, este modo de control seguirá operando hasta que produzca una corrección exacta para cada desviación de la variable de proceso. La desventaja de este modo de control es que tiende a ser lento cuando el error es reducido, por cuanto la velocidad y magnitud de los desplazamientos del elemento final de control son proporcionales al valor del error.

### 5.3.4 Modo de control proporcional más integral: PI

Como indicamos anteriormente, el modo proporcional puede aportar rapidez a un control, aunque, para cambios de carga, deja una desviación permanente; mientras que el modo integral produce correcciones exactas ante cambios de carga, pero tiende a ser lento. Si combinamos ambos modos de control podemos lograr la rapidez y exactitud necesarias para mantener bajo control un proceso determinado. Este modo combinado se denomina usualmente reajuste.

### 5.3.5 Modo de control derivativo D

El modo de control derivativo es aquel en el que la señal de corrección al elemento final de control es proporcional a la razón de cambio del error actuante, es decir, a la velocidad de variación de ese error.

La ventaja de este modo de control sobre los otros es su carácter de anticipación, ya que en cuanto detecta un cambio en el error, inmediatamente puede provocar cambios muy grandes en la posición del elemento final de control, con lo cual podemos lograr que la variable controlada no se aleje demasiado de su valor de ajuste.

Este modo de control no puede utilizarse solo, sino únicamente combinado con otros modos de control. Se lo utiliza, más que nada, para contener la desviación de la variable controlada, más no para corregirla.

### 5.3.6 Modo de control proporcional más derivativo PD

Si al modo derivativo le agregamos el modo proporcional, podemos lograr aun mayor rapidez y que la variable controlada, ante disturbios, permanezca finalmente con un valor más cercano al ajuste. Pero esta combinación también deja un error permanente (aunque menor que el que se obtendría con dichos modos de control por separado) debido a sus características particulares.

Podríamos definir cada una de las acciones del control PID con los siguientes enunciados:

1. El modo Proporcional da una respuesta inmediata proporcional a la magnitud del error.
2. El modo Integral se encarga de alinear a la variable controlada con el punto de ajuste. Es decir trabaja en función del tiempo que dura el error.
3. El modo derivativo se anticipa a las variaciones del error.

En la mayoría de procesos actuales se utiliza el control PID con muchas variantes. Los modos de control descritos previamente pueden ser combinados en un controlador para obtener todas sus ventajas.

Concluyendo se puede decir que el más rápido y eficaz lo es el PID, pero encontraremos que los requerimientos de control, de los procesos de una planta termoeléctrica, se satisfacen normalmente, de acuerdo a sus necesidades y características, ya sea con el proporcional puro o con el modo combinado proporcional más integral. El modo combinado  $P + I + D$  se utiliza en procesos donde se requiere alta velocidad y exactitud.

## 5.4 Operaciones básicas.

En un sistema de lazo de control cerrado, podemos ver que invariablemente se encuentran presente cuatro operaciones básicas, que son:

- 1) Medición
- 2) Comparación
- 3) Calculo
- 4) Corrección

Estas operaciones se realizan siempre en el orden descrito y en forma cíclica hasta reducir la desviación a cero. En la figura 5.3 se muestra en un diagrama de bloques, las operaciones básicas.

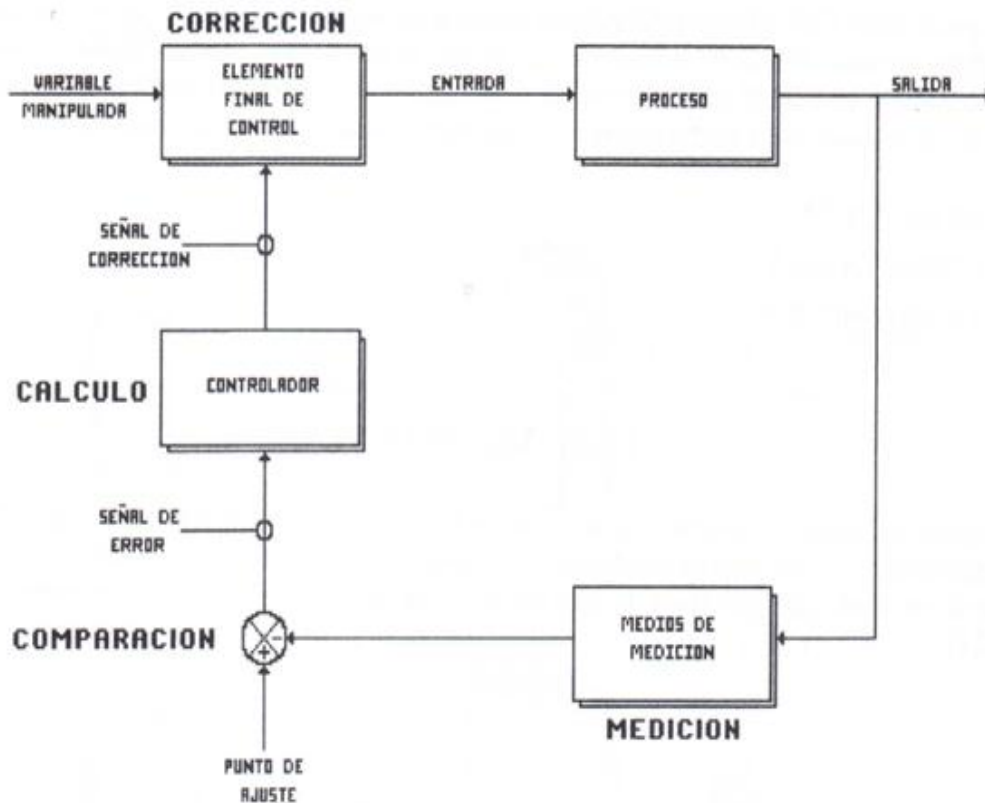


Figura 5.3 Operaciones básicas (Diagrama de bloques)

Fuente: CFE. Centro de capacitación Celaya. Fundamentos de teoría de control.

## 5.5 Simbología

Para poder interpretar los diagramas de control de procesos en los generadores de vapor y centrales de generación, usamos los principales símbolos, los cuales están regidos por las normas ISA (Instrument Society of America). La tabla 5.1 nos muestra los diferentes símbolos empleados en la elaboración de diagramas de control para representar en forma simplificada los sistemas de control.








FUNCIÓN	SÍMBOLO
MEDIDOR	
PROCESADOR DE SEÑAL AUTOMÁTICA	
PROCESADOR DE SEÑAL MANUAL	
ELEMENTO FINAL DE CONTROL	
SUMADOR O TOTALIZADOR	$\Sigma$
DIFERENCIA O COMPARADOR	
PROMEDIO	$\Sigma/n$
MULTIPLICADOR	$X$
PROPORCIONAL	$K$
INTEGRAL	$\int$
DERIVATIVO	$d/dt$
BÍAS	$A$
SELECTOR DE SEÑAL MENOR	$<$
SELECTOR DE SEÑAL MAYOR	$>$
LIMITADOR BAJO	
LIMITADOR ALTO	
GENERADOR DE FUNCIONES	$f(x)$
TRANSFERENCIA	$T$
RETARDO	$f(t)$

Tabla 5.1 Símbolos para diagramas de control.

Fuente: CFE. Centro de capacitación Celaya. Fundamentos de teoría de control.

## 5.6 Elaboración de un diagrama de control

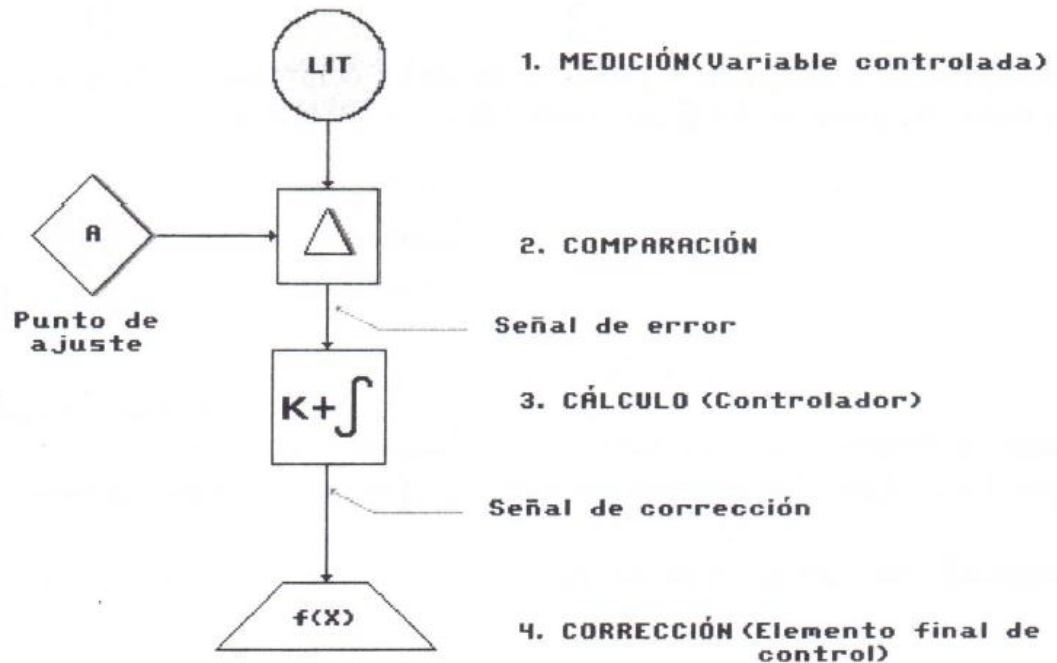


Figura 5.4 Diagrama de control básico

Fuente: CFE. Centro de capacitación Celaya. Fundamentos de teoría de control.

## 5.7 Válvulas de control (Elemento final de control)

En el control automático de los procesos industriales la válvula de control juega un papel muy importante en el bucle de regulación. Realiza la función de variar el caudal del fluido de control que modifica a su vez el valor de la variable medida comportándose como un orificio de área continuamente variable. Dentro del bucle de control tiene tanta importancia como el elemento primario, el transmisor y el controlador. En la figura 5.5 puede verse una válvula de control típica. Se compone básicamente del cuerpo y del servomotor. El cuerpo de la válvula contiene en su interior el obturador y los asientos y está provisto de rosca o de bridas para conectar la válvula a la tubería. El obturador es quien realiza la función de control de paso del fluido y puede actuar en la dirección de su propio eje o bien tener un movimiento rotativo. Está unido a un vástago que pasa a través de la tapa del cuerpo y que es accionado por el servomotor.



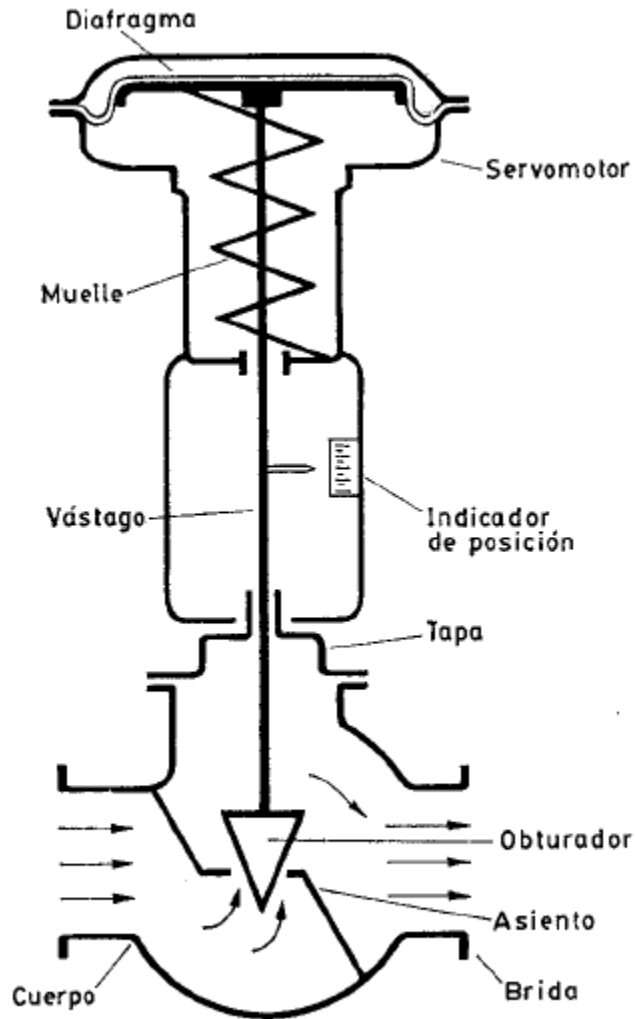


Figura 5.5 Válvula de control representativa  
 Fuente: Creus Solé, Antonio. Instrumentación Industrial.

### 5.8 Control de calderas

El sistema de control de una caldera es la herramienta mediante la cual se consiguen los equilibrios de masa y de energía en la misma ante las variaciones de la demanda de los consumidores. La energía y la masa introducidas en la caldera deben ser reguladas para conseguir las condiciones de salida deseadas. Las medidas de las variables del proceso darán al sistema la información necesaria para ello. En la Figura 5.6 se muestra mediante un diagrama de bloques el esquema general del control de una caldera.

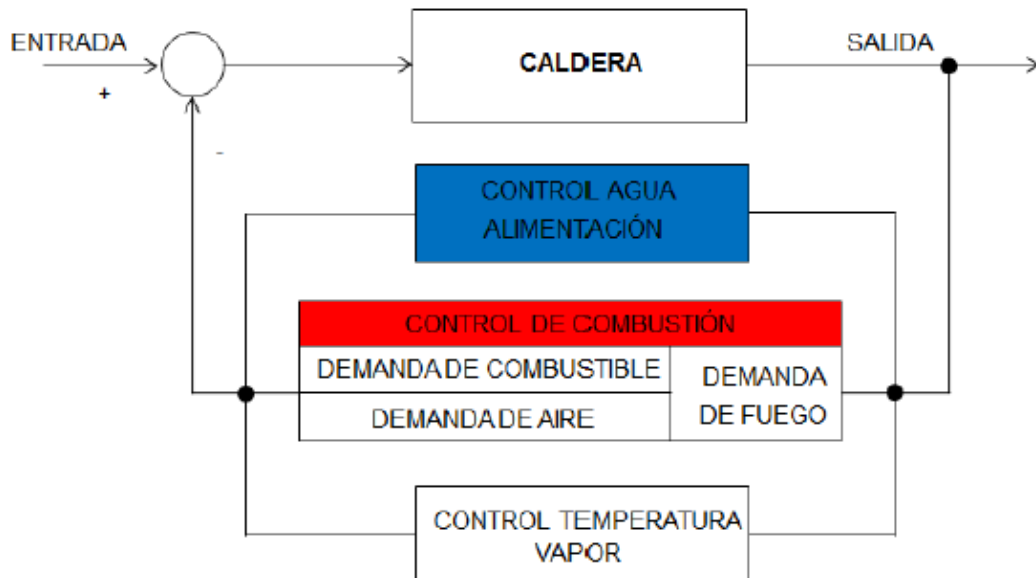


Figura 5.6 Esquema general del control de una caldera

**Fuente:** Mezu, Jhonatan. "Diseño del lazo de control de combustión para la regulación del vapor vivo en una caldera industrial".

Desde el punto de vista del equilibrio energético se debe generar una demanda de carga (de fuego), de la cual se generarán a su vez las demandas de aire y combustible, que proporcionarán el aporte de energía necesario para mantener el equilibrio respecto a la salida de vapor. El control de nivel será el encargado de mantener el equilibrio entre la masa saliente en forma de vapor y la entrante en forma de agua. La temperatura del vapor será mantenida mediante el control de temperatura de éste, con su influencia, tanto en el equilibrio de energía como de masa.

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

La primera consideración como consecuencia de lo anterior es en donde se requiere un sistema multivariable o lazos simples independientes. En general, usaremos lazos de control simples en aquellas variables que no influyen, ni están influidas, por otras externas al lazo, como pudiera ser, la presión de suministro de combustible, siempre que sus valores de consigna sean fijos y no, función de otras variables del sistema.

Un sistema cuyas acciones son tomadas en paralelo está generalmente menos interaccionado que uno que las toma en serie. Un ejemplo de esto sería el control de combustión en el cual la cantidad de aire y combustible se modifican a la vez en lugar de una y después la otra, en cuyo caso una perturbación en la primera variable se propaga en la segunda perturbando ésta y viceversa.

## 5.9 Variables a controlar en una caldera

Las variables que se controlan se clasifican en tres grupos: variables a regular, variable perturbadora y variables de regulación.

### 5.9.1 Variables a regular

Son las que deben ser mantenidas en un valor determinado para que el funcionamiento de la caldera sea el correcto. Estas son:

- Presión de vapor
- Temperatura del vapor
- Nivel del tambor de vapor
- Presión en el hogar
- Relación aire combustible
- Exceso de oxígeno
- Temperatura de combustible
- Presión de combustible
- Diferencial vapor de atomización
- Posición de registro y difusores

### 5.9.2 Variable perturbadora

Tienen su origen en la demanda requerida de vapor que desequilibra la relación entre la energía que entra en forma de combustible y la que sale en forma de vapor, de esta manera se afectan los factores a regular que actuarán unos sobre otros.

### 5.9.3 Variables de regulación

Con ellas se compensa la influencia de las variables perturbadoras sobre las variables reguladoras. Estas variables son:

- ❖ **Control de agua de alimentación:** Su objetivo es igualar el flujo de agua de alimentación con el flujo de vapor, manteniendo un nivel estable en el tambor de vapor durante cargas bajas, altas, o con cambios rápidos, tomando como referencia la producción de vapor requerido y el nivel del tambor.
- ❖ **Control de combustión:** Su función es regular la entrada de combustible para mantener un suministro continuo de vapor a una presión constante, y regular la entrada de aire a la caldera en proporción correcta a la entrada de combustible. En las calderas de tiro balanceado también regula la extracción o salida de gases de combustión para mantener un tiro constante en el hogar.
- ❖ **Control de temperatura:** Es muy importante en calderas que alimentan turbinas. Aunque se pudiera pensar que entre más alta la temperatura de vapor, mayor eficiencia de la caldera, esto está limitado por la resistencia de los aceros y demás materiales.

## 5.10 Controles básicos de calderas

La caldera es el equipo que convierte agua en vapor aplicando calor o energía proveniente de la combustión en un quemador. De su correcta elección y equipamiento depende en buena parte el rendimiento total del sistema de vapor. El vapor proveniente de la caldera debe ser suministrado en la cantidad, temperatura y presión correctas.

Los objetivos del equipamiento de la caldera son:

- Funcionamiento
- Seguridad
- Eficiencia

En cuanto a los controles que se colocan para el buen funcionamiento de la caldera podemos mencionar los siguientes:

- Sistema de control de nivel de agua
- Control de bomba de agua de alimentación
- Control del quemador de combustible
- Presostatos
- Válvulas de interrupción o de corte
- Manómetros

Consideremos el diagrama de la figura 5.7

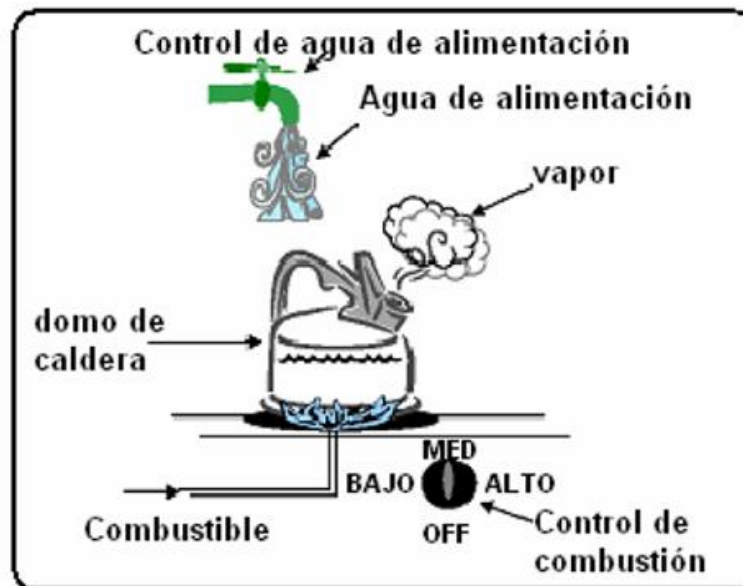


Figura 5.7 Simulación de controles en una caldera

**Fuente:** Figueroa, Arcenio. "Tendencias tecnológicas en el control e Instrumentación de calderas"

Conforme el agua hierve el vapor fluye y el nivel de agua en la olla baja. Si el nivel cae demasiado la olla comenzará a quemarse. Esto es algo no deseable. Tenemos dos acciones a tomar:

Bajar la llama bajo la olla o agregar agua a la olla.

Ajustar la llama es el propósito del control de combustión y ajustar el nivel de agua es el propósito del control del nivel del domo algunas veces llamado control de agua de alimentación.

### 5.11 Control de nivel

La regulación del agua de alimentación que establece el nivel de la caldera depende de varios factores, del tipo de caldera, de la carga, del tipo de bomba y del control de 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, según la tabla 5.2 que figura a continuación y que el lector debe tomar sólo como guía de selección teniendo presente que cada caso individual debe estudiarse separadamente.

**Sistemas de control de nivel**

Tipo	Variables	Capacidad de la caldera, kg/h		
		< 6000	6000-15 000	> 15 000
Un elemento	nivel	Cargas irregulares	Pequeños cambios de carga	Cargas mantenidas
Dos elementos	nivel caudal de vapor	Cargas irregulares con grandes fluctuaciones	Cambios de carga moderados	Lentos cambios de carga moderados
Tres elementos	nivel caudal de vapor caudal de agua			> 20 000

Tabla 5.2 Sistema de control de nivel  
Fuente: Creus Solé, Antonio. Instrumentación Industrial.

#### 5.11.1 Control de nivel de un elemento

Este sistema de control utiliza solo la señal de **nivel** para modificar el flujo de agua de alimentación. Como se puede ver en figura 5.8.

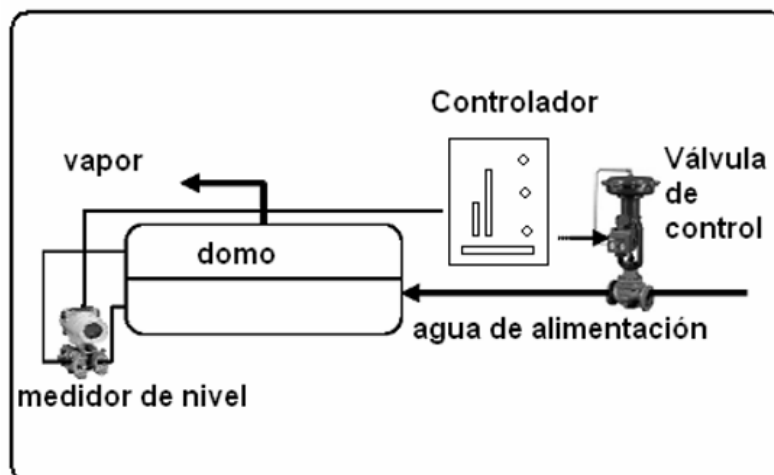


Figura 5.8 Control de nivel modulante de un elemento.  
Fuente: Figueroa, Arcenio. "Tendencias tecnológicas en el control e Instrumentación de calderas"

Si el flujo de vapor de turbina disminuye o aumenta, esto se refleja en una variación de nivel, lo cual origina una desviación o error. De acuerdo a esta señal de error, el controlador generara una corrección que, pasando a través de la estación de transferencia, si esta en automático, cambiará la posición de la válvula para obtener el flujo de agua de alimentación para la nueva condición de carga y controlar el nivel en el valor deseado. Ver figura 5.9

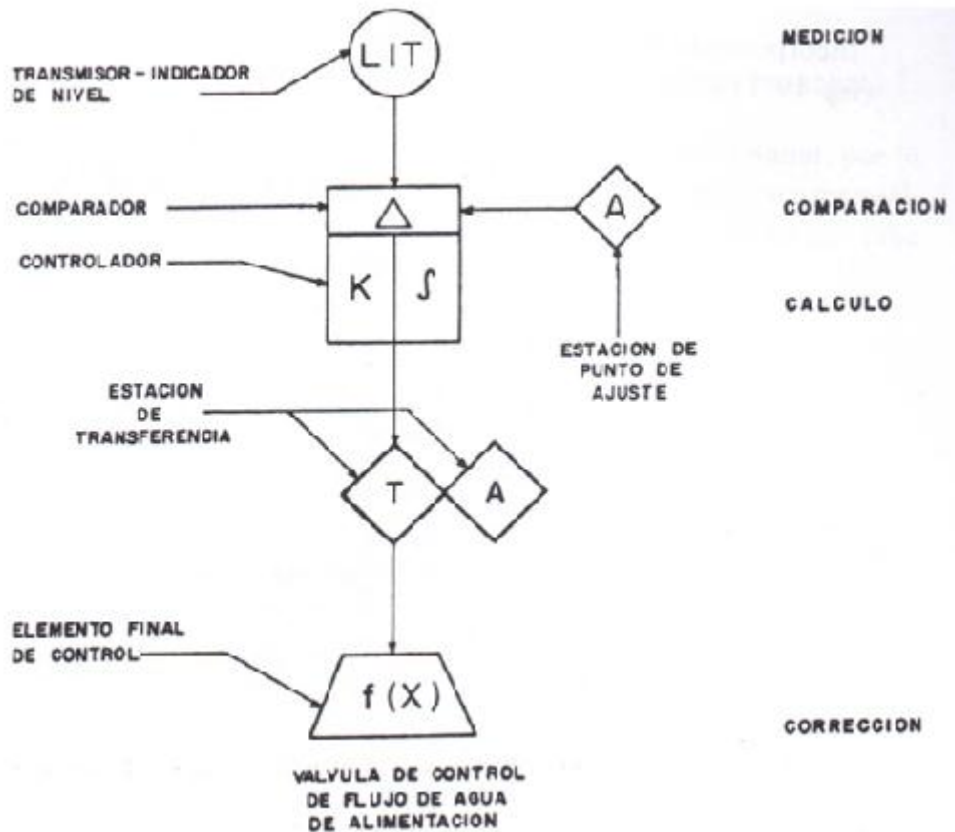


Figura 5.9 Control de nivel del domo de un elemento

Fuente: CFE. Centro de capacitación Celaya. Fundamentos de teoría de control.

Este sistema de un solo elemento es adecuado únicamente para generadores de vapor pequeños, hasta de 40 Ton/hr. Y con carga estable. Para unidades de mayor capacidad y con carga variable, este sistema no es adecuado debido a que cuando existen cambios de carga, el nivel presenta variaciones que provocan que el control responda momentáneamente en forma contraria a la respuesta requerida. Esto sucede debido a dos fenómenos:

- 1) "Dilatación" del nivel.- Cuando la demanda de vapor aumenta, provoca una caída de presión en el domo de la caldera. Esto hace que aumente la cantidad y magnitud de burbujas de vapor que se encuentran en la fase líquida, subiendo momentáneamente el nivel. Como mencionamos el control de un solo elemento responde nada mas ante cambios de nivel, por lo cual, ante el disturbio anterior manda disminuir la apertura de la válvula, cuando lo que se requiere es abrirla, ya que el flujo de vapor en la salida aumentó y, una vez normalizada la presión, el nivel se abatirá, al ser mayor el flujo de salida (vapor) que el de entrada (agua).

- 2) “Contracción” del nivel.- Cuando la demanda de vapor se reduce, la presión en la caldera se incrementa provocando con ello que las burbujas de vapor se encuentran en la fase líquida se reduzcan en número y tamaño, disminuyendo el nivel. El control al detectar que el nivel se redujo, aumentara el flujo de agua, cuando lo que se requiere es decrementarlo debido a la reducción en la demanda de vapor, por lo que, al normalizarse la presión, el nivel subirá, debido a que ahora el flujo de entrada (agua) es mayor que el de salida (vapor).

### 5.11.2 Control nivel de dos elementos

En esta estrategia es medido además del nivel, el flujo másico de vapor. Ver figura 5.10. El medidor de flujo de vapor indica al controlador el cambio en la demanda de vapor y este anticipa el cambio resultante en el nivel. De acuerdo con la demanda de caudal de vapor hay una aportación inmediata de agua de alimentación a través del controlador secundario de nivel.

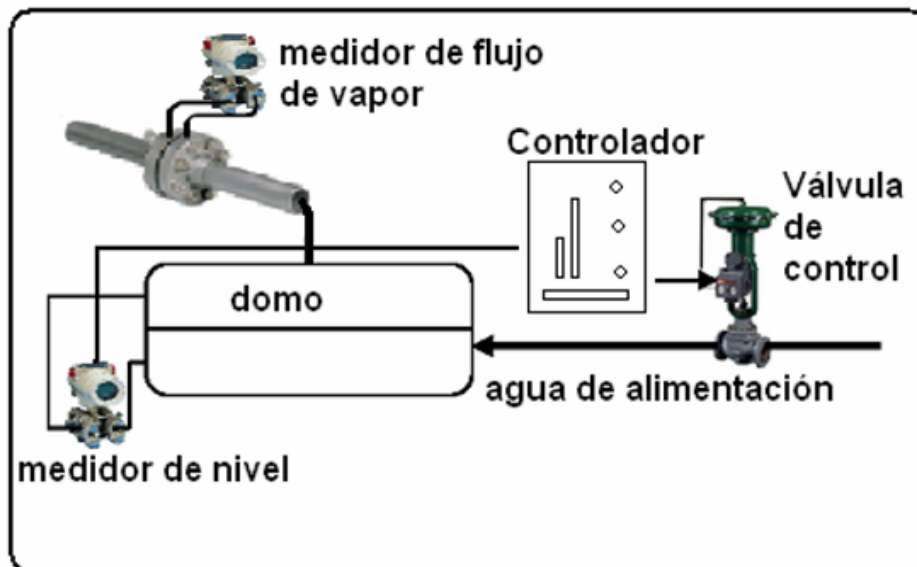


Figura 5.10 Control modulante de dos elementos

**Fuente:** Figueroa, Arcenio. “Tendencias tecnológicas en el control e Instrumentación de calderas”

Para evitar que los efectos mencionados provoquen la acción incorrecta del control, se introdujo la señal del flujo de vapor como otro elemento a controlar. En este sistema, la señal de flujo de vapor tiene carácter de anticipación. Al cambiarla demanda, antes que varíe el nivel, la señal anticipatoria manda a posicionar la válvula de control en el sentido y magnitud aproximadamente correctas para absorber la nueva demanda. Cuando se equilibra nuevamente el sistema en cuanto a demanda y alimentación, el error residual en el nivel es eliminado por el elemento restante (Nivel), como se explicó en el sistema anterior, de un elemento. Figura 5.11.

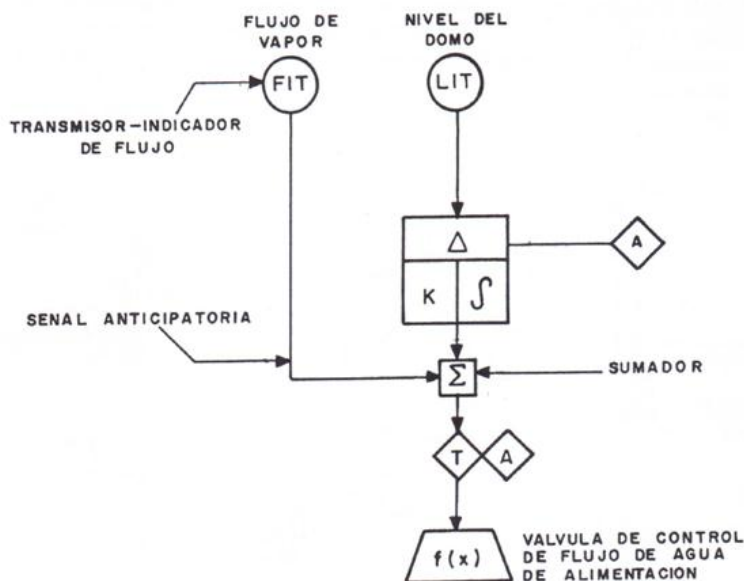


Figura 5.11 Control de nivel del domo de dos elementos.  
**Fuente:** CFE. Centro de capacitación Celaya. Fundamentos de teoría de control.

El sistema de dos elementos es adecuado para generadores de vapor de hasta 100 Ton/hr., y con régimen de carga variable.

### 5.11.3 Control de tres elementos

En esta estrategia son medidos el nivel, el flujo de vapor y el flujo de agua de alimentación de aquí el término tres elementos. Debido a que todas las variables que contribuyen al cambio de nivel están siendo monitoreadas y consideradas por la estrategia de control, esta es la estrategia que provee la mejor respuesta a los cambios de carga. Esto es ideal para calderas con demandas súbitas o impredecibles.

Según información teórica disponible en la página electrónica; <http://blearning.itmina.edu.mx/dep/sada/carreras/Ingenieria%20Electronica/6to%20Semestre/Instrumentacion/instrumentacion.doc.>, señala que regulación de tres elementos descarta el fenómeno de oscilación del nivel que se produce cuando el caudal de vapor crece o disminuye rápidamente. Cuando el caudal de vapor acrecienta bruscamente, la presión baja, con lo que se origina vaporización rápida que fuerza la elaboración de burbujas de agua, lo que da lugar al aumento aparente de nivel de la caldera.

La oscilación es opuesta a la demanda y el fenómeno es importante en calderas de cierta potencia y volumen reducido, sujetas a variaciones de caudal frecuentes y rápidas.

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 ajustarse periódicamente para que se mantenga dentro de unos límites determinados (normalmente son de unos 50 mm por encima y por debajo de la



línea central del domo de la caldera). Manteniendo estas funciones en las tres variables, los instrumentos correspondientes pueden estar relacionados entre sí de varias formas. Por ejemplo una señal anticipativa del caudal de vapor, se superpone al control de nivel, y se tiene por objeto dar prioridad a las diferencias entre los caudales de agua y de vapor frente a las variaciones del nivel que pueden producirse ante una demanda súbita, es decir, el sistema de control en estas condiciones actúa obedeciendo a la diferencia relativa de caudales con preferencia a los cambios de nivel. (Figura 5.12).

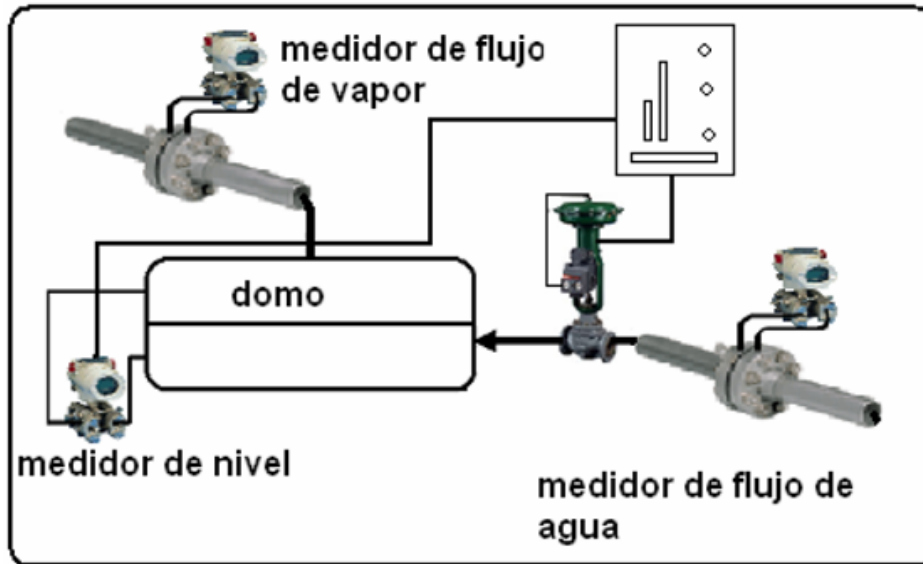


Figura 5.12 Control de nivel modulante de tres elementos

**Fuente:** Figueroa, Arcenio. "Tendencias tecnológicas en el control e Instrumentación de calderas"

Como ya mencionamos la elección de la estrategia de control de nivel depende del tipo de oscilaciones de carga que la caldera experimentará.

Cambios lentos de carga con un gran domo pueden ser manejados con un solo elemento, pero típicamente son recomendados al menos dos elementos de control ya que esto ayuda a proteger contra el burbujeo (*swell*) y contracción (*shrink*) dentro de la caldera que son efectos del rápido cambio de la tasa de calentamiento. Cuando hay un incremento de la carga la presión disminuye y se produce un burbujeo que da un valor falso del nivel de agua y si hay una disminución en la carga la presión se eleva y las burbujas de vapor se contraen dando también un valor falso del nivel el cual se expande cuando la presión es restaurada. Si la presión del agua de alimentación varía, es recomendable contar con tres elementos de control para mantener la linealidad sobre la válvula de alimentación.

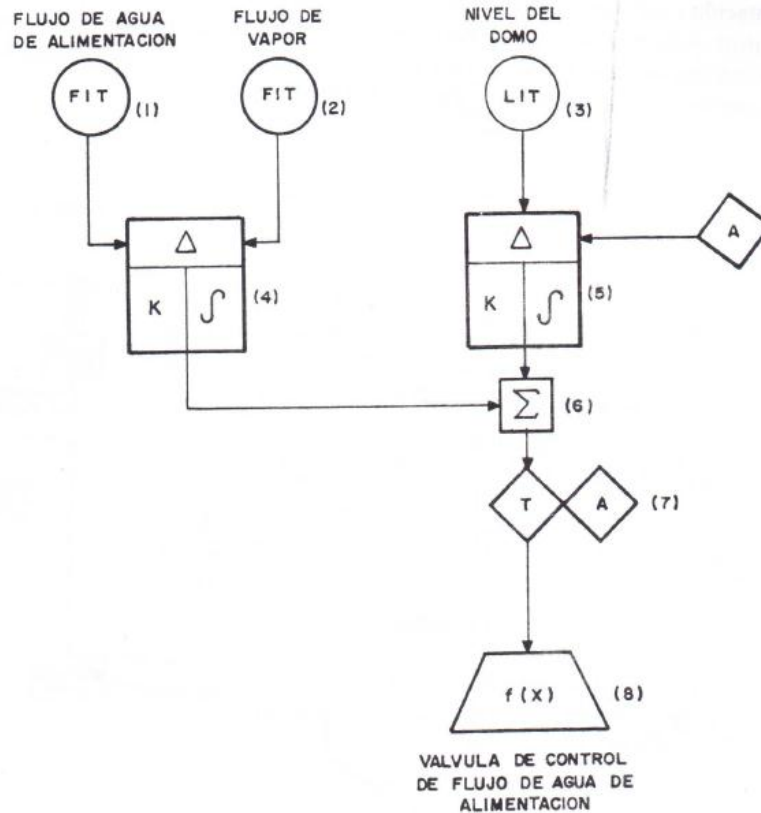


Figura 5.13 Control de nivel del domo de tres elementos.

**Fuente:** CFE. Centro de capacitación Celaya. Fundamentos de teoría de control.

En este sistema, permanentemente se están comparando entre sí los flujos de vapor (2) y de agua de alimentación (1), o sea, las masas de salida y de entrada, respectivamente. Cuando cambia la demanda de flujo de vapor, inmediatamente se establece una diferencia para que, por medio del controlador (4) se genere una señal de corrección, anticipatoria al nivel del domo, que modifique la posición de la válvula de control hasta que ambos flujos se igualen. Como esta acción no es instantánea, cuando los flujos logren equilibrarse quedará un error en el nivel, el cual es corregido por el controlador (5), generando otra señal de corrección que se suma a la del controlador (4), en el sumador (6), para llevar el nivel al valor correcto. Ver figura 5.13.

En este sistema, se considera que el 90% del control se efectúa por flujos y el 10% restante por nivel, lo que lo hace poco sensible a los efectos de nivel por cambios de carga, e independiente a los dispositivos de suministro de agua (válvulas de control, variadores de velocidad o la combinación de ambos).

Esta configuración puede presentar problemas a bajas cargas por las limitaciones de las medidas de caudal. Una solución muy extendida para este problema, es la conmutación del control de agua de alimentación de uno a tres elementos de forma automática a partir de un caudal mínimo de vapor que suele estar entorno al 20%, valor para el cual las medidas son más fiables. A continuación se muestra otra alternativa de un control del calderín de tres elementos empleando una válvula para bajas cargas y otra para altas cargas. Ver figura 5.14.

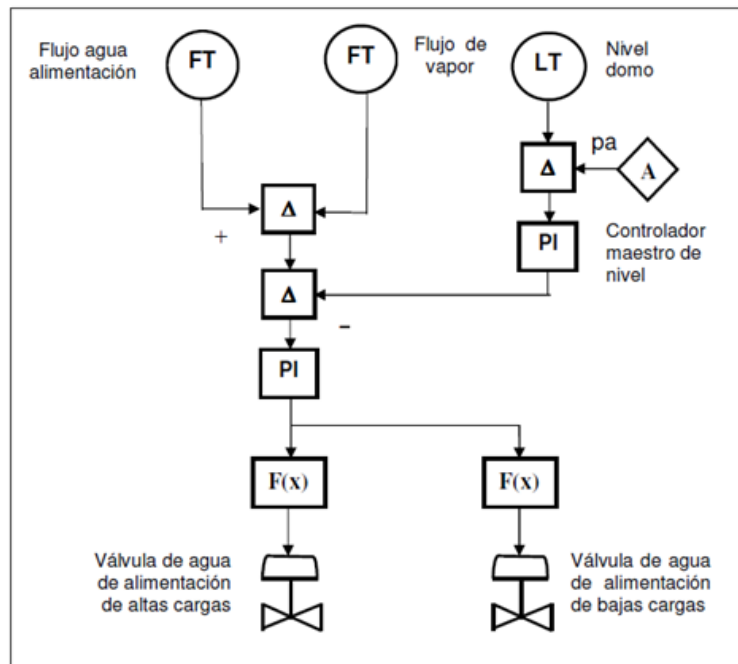


Figura 5.14 Control de nivel del domo de tres elementos con dos válvulas de control  
**Fuente:** Méndez, Fany "Control del sistema de combustión para una termoeléctrica convencional"

Este esquema de control utilizado aplica un balance de materia con los flujos de agua de alimentación y de vapor restando el primero del segundo, esta diferencia es después compensada con la señal de salida del controlador maestro de nivel del domo. El controlador maestro opera con los modos de proporcional mas integral (controlador PI), por tanto, cualquier diferencia entre el punto de ajuste del nivel del domo y el nivel real del agua en el mismo hará que esta compensación, por efecto de la acción integral del controlador maestro, cambie continuamente buscando que el nivel del domo este en el valor de su punto de ajuste.

Un segundo controlador, el cual recibe como entrada la diferencia de flujos compensada por la salida del controlador maestro de nivel, posicionara a las válvulas de control de agua de alimentación variando al flujo de agua de alimentación de manera que el nivel se recupere de las desviaciones de su punto de ajuste.

La manipulación del flujo de agua de alimentación se realiza mediante dos válvulas, una para operar en baja carga y otra para operar en alta carga. En la práctica real la señal de nivel es compensada por presión del domo debido a que los transmisores de nivel típicos miden la columna de agua en piernas (tubos) con temperatura del agua inferior a las del domo. El flujo de vapor medido como vapor sobrecalentado, se compensa por presión y temperatura, y el flujo del agua de alimentación se compensa con la temperatura del domo y se le suma el flujo agua atemperación que se desvía para este propósito.<sup>5</sup>

<sup>5</sup> Méndez, F. "Control del sistema de combustión para una termoeléctrica convencional" Memoria para optar por el título de Ingeniero en Comunicaciones y Electrónica, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica Eléctrica, Instituto Politécnico Nacional, México, 2007

## 5.12 Control de combustión

La regulación de la combustión se basa en mantener constante la presión de vapor en la salida de caldera, tomándose sus variaciones como una medida de la diferencia entre el calor tomado de la caldera como vapor y el calor suministrado. El controlador de la presión de vapor ajusta la válvula de control de combustible, la señal procedente del caudal de aire es disminuida o aumentada en una relación determinada y se compara con el valor actual del caudal de combustible.

El objetivo del sistema de control de combustión es proveer la combinación correcta de aire y combustible para producir segura y económicamente la cantidad requerida de vapor. La cantidad requerida de vapor es llamada demanda.

Con la olla y la estufa que analizamos al anteriormente nos preocupamos únicamente por el nivel de la olla y el flujo de combustible. El vapor no estaba siendo utilizado para ninguna cosa. En lugar de la olla, veamos un tanque cerrado proveyendo vapor a radiadores en una casa (figura 5.15). Ahora que nosotros estamos produciendo vapor en un tanque cerrado, tenemos que tratar con la presión.

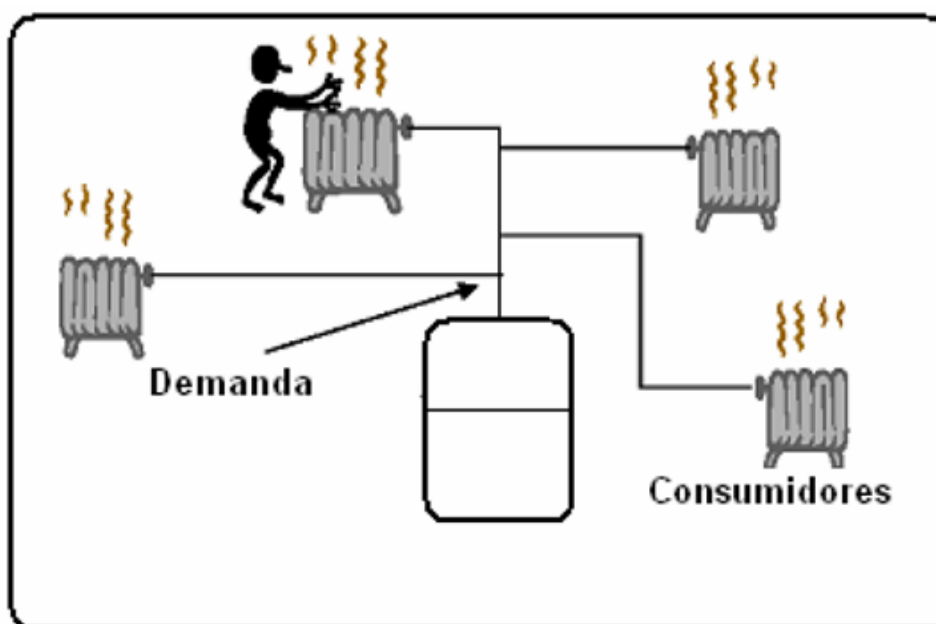


Figura 5.15 Variaciones de presión en el consumo de vapor.

**Fuente:** Figueroa, Arcenio. "Tendencias tecnológicas en el control e Instrumentación de calderas"

Conforme se encienden los radiadores la presión en el domo de la caldera tiende a bajar, de manera contraria, si tenemos encendidos todos los radiadores y vamos apagando uno por uno la presión tenderá a subir. Necesitamos un sistema de control que responda a esas variaciones de carga de manera que la presión se mantenga constante, esa es la función del control de combustión.

En el sistema de control de combustión automático un controlador determina el punto de ajuste para la demanda de vapor requerida. Cuando la planta demanda más vapor que el que está siendo producido, la presión de vapor cae, lo cual causa que el controlador incremente la tasa de calentamiento (aumenta la llama). Lo opuesto es también cierto, disminución del uso del vapor incrementa la presión en la caldera y el controlador reduce la tasa de calentamiento. Además de incrementar o disminuir la tasa de calentamiento el control de combustión es responsable de mezclar el combustible y el aire en una proporción correcta para que la ebullición del agua no cause una explosión. Esto es llamado control de relación aire/combustible.

### **5.13 Combustión y control de carga**

El control de carga de una caldera se gestiona generalmente para mantener constante la presión y/o la temperatura. La variación de presión se produce por:

- 1) Carga de la caldera. Un aumento de la carga sin entrada de combustible adicional produce una caída de presión. Una disminución de la carga sin una disminución pareja del combustible causa un aumento de presión.
- 2) Entrada de combustible a la caldera. Un aumento en la entrada de combustible producirá un aumento de presión, mientras que una entrada baja causaría una caída de presión.

De este manera, la regulación de presión y combustible, o controles de la combustión, están relacionados directamente. Por esta razón, los controles de combustión están gestionados por modulación a través de las variaciones de presión dentro unos límites estrechos. Mientras el caudal de aire y el caudal de escape normalmente siguen al caudal de combustible, este último está determinado por el ajuste de los límites de presión dentro de los cuales opera la caldera.

### **5.14 Control de combustión**

Según (Villajulca J. , 2009) recomienda que, un sistema de control de combustión debe cumplir, entre otros, con los siguientes requisitos de diseño

- La intervención de combustión debe conservar la relación aire-combustible en un rango que asegure una quema continua y una llama estable en todas las condiciones de operación.
- La solicitud de combustible no debe acrecentar nunca el caudal de combustible por encima del de aire.
- La solicitud de combustible no debe nunca aventajar el contenido de los ventiladores en servicio.
- Cuando se queman variados combustibles, se sumarán basándose en sus poderes caloríficos.
- La contribución de calor a una zona o quemador no debe exceder los límites especificados.
- Conservar los caudales de aire y combustible de acuerdo con la demanda de carga de la caldera, para entregar al sistema la energía

requerida para la provisión del caudal de vapor deseado, manteniendo el equilibrio energético.

- Custodiar, dentro de los requisitos del punto anterior, un exceso de aire mínimo que permita conseguir los mayores niveles de eficacia posibles.

### **5.15 Control de combustión en calderas de recuperación**

El objetivo del control de combustión en una caldera de recuperación es, como en el caso de una caldera industrial, mantener el caudal de combustible de acuerdo con la demanda de carga de la caldera, en el rango de trabajo de la postcombustión para entregar al sistema la energía requerida para el suministro del caudal de vapor deseado manteniendo el equilibrio energético en el sistema.

Para un control de turbina en seguimiento, en donde la presión del vapor principal es la variable maestra del control de combustión, es decir, cuando el sistema se encuentra operando en su carga base, la regulación del combustible proporcionará la energía necesaria para la producción (flujo) de vapor que requiera la turbina.

En vista de que el combustible requiere aire para su combustión este se suministra en la proporción que la reacción de combustión necesite para efectuarse de manera completa, lo cual se garantiza con un exceso de aire que varíe según el combustible utilizado pudiendo llegar hasta un 20% en el combustible con respecto a la cantidad estequiométrica, por lo tanto el sistema de control de combustión regula el aire de combustión de acuerdo al combustible que consume.

La figura 5.16 muestra el diagrama de bloques de control de combustión donde se ilustra la funcionalidad del control.

Un controlador PI genera la señal de posición de las entradas de aire del tiro forzado pero esta señal tiene como señal anticipatoria al flujo de combustible representado por la señal de salida del controlador maestro de presión, así cualquier cambio en el flujo de combustible, como consecuencia del movimiento en la señal del controlador maestro, tendrá efecto inmediato en el flujo de aire.

El controlador maestro de presión, P+I (Proporcional más Integral) genera la señal de control para la válvula de combustible, señal que es limitada por la señal de flujo de aire de combustión caracterizado más una desviación que no debe sobrepasar el flujo de combustible.<sup>6</sup>

---

<sup>6</sup> Méndez, F. "Control del sistema de combustión para una termoeléctrica convencional" Memoria para optar por el título de Ingeniero en Comunicaciones y Electrónica, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica Eléctrica, Instituto Politécnico Nacional, México, 2007

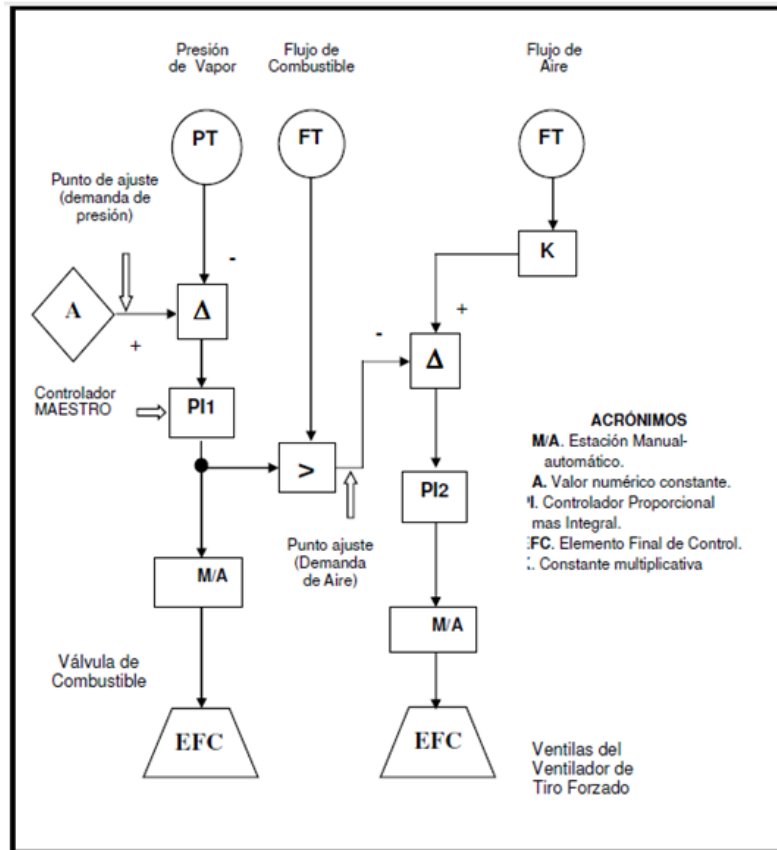


Figura 5.16 Diagrama de bloques de control de combustión

Fuente: Méndez, Fany "Control del sistema de combustión para una termoeléctrica convencional"

## 5.16 Control en cascada

Una de las técnicas para mejorar la estabilidad de un circuito complejo es el empleo del control en cascada. Su utilización es conveniente cuando la variable controlada no puede mantenerse dentro del punto de consigna, por óptimos que sean los ajustes del controlador, debido a las perturbaciones que se producen en alguna condición del proceso.

Es un tipo de control compuesto. El control en cascada es una técnica muy utilizada para aumentar la estabilidad de los circuitos de control cuando la variable manipulada esta sujeta a variaciones que son independientes del elemento final de control, además de que reduce los efectos del retraso de tiempo del proceso, lo que de otra manera repercutiría en lentitud de la respuesta del control. En esta forma de control la variable controlada es la señal principal maestra, y el controlador que la recibe se le llama Maestro, el cual tiene como función principal proporcionar el punto de ajuste un segundo controlador llamado Esclavo.

Algunos ejemplos de este control pueden ser:

- Control de presión de vapor
- Control de temperatura vapor sobrecalentado
- Control de temperatura vapor recalentado

### 5.16.1 Control de sobrecalentamiento

Las grandes calderas de alta presión generan vapor sobrecalentado y recalentado. Temperaturas de 538°C son normales, y hay unidades que trabajan a 566°C. A causa de estas temperaturas elevadas que solo están limitadas por razones metalúrgicas, las temperaturas de vapor deben mantenerse dentro de estrictos límites, tanto por razones de seguridad como económicas.

### 5.17 Control de presión del fuel oil

El objetivo de este lazo es mantener la presión del suministro de fuel oil en su valor adecuado y requerido. El mantener la presión correcta en el suministro del fuel oil será un elemento necesario para poder realizar un control de caudal, de acuerdo con la demanda de carga, satisfactorio.

#### Filosofía del control

La presión de impulsión de las bombas de suministro de fuel oil es variable en función del caudal que están suministrando. Dicho caudal a su vez dependerá lógicamente del consumo. Para conseguir que esta presión se mantenga constante independientemente del caudal suministrado se regulará el retorno de combustible al tanque de almacenamiento por medio de una válvula de recirculación, de forma que este caudal variable compense las variaciones del caudal de suministro a los quemadores. Para ello utilizaremos un control PI simple como el de la figura 5.17.

Si la presión aguas abajo de las bombas sube, la válvula de retorno abrirá en orden a reducirla y viceversa.

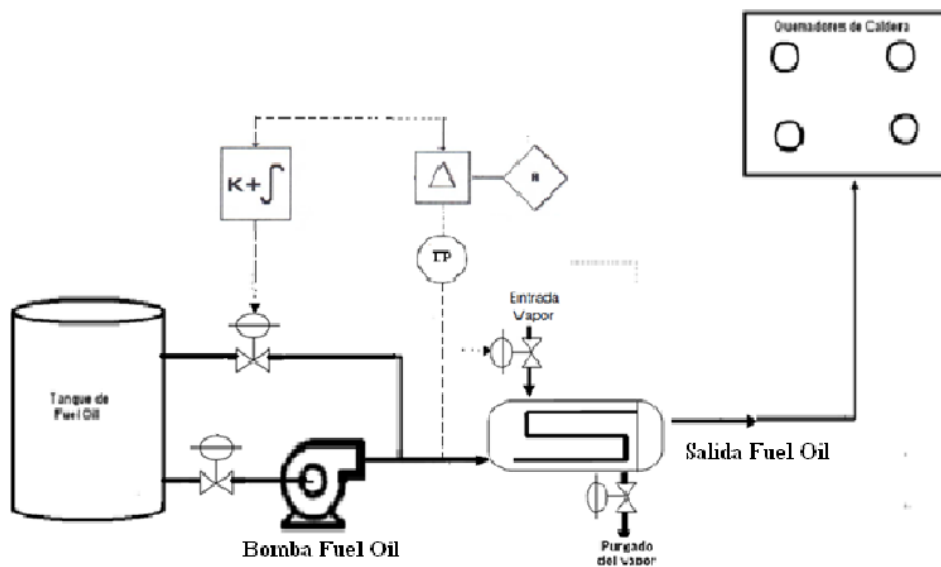


Figura 5.17 Control de presión de fuel oil.

Fuente: El autor

La figura 5.18 presenta el diagrama de control en bloques.



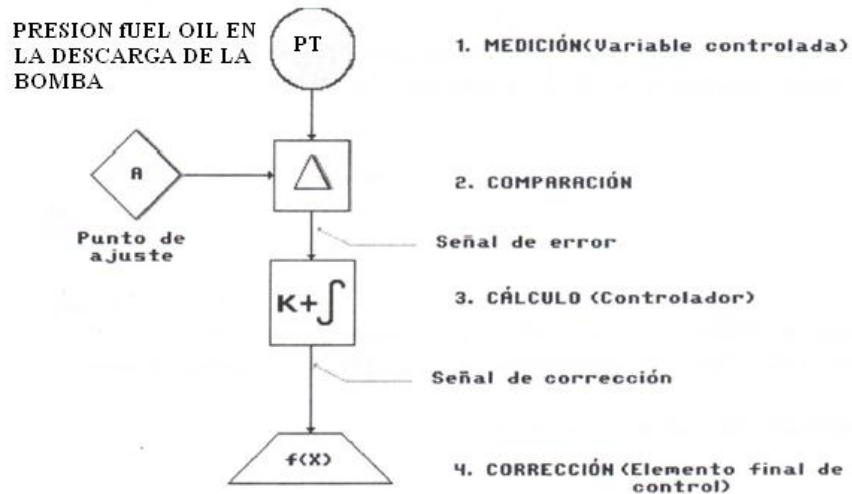


Figura 5.18 Diagrama de control de presión del fuel oil.  
Fuente: El autor.

### 5.18 Control de temperatura del fuel oil

El objetivo de este lazo es mantener la temperatura del fuel oil en el valor deseado. El mantener una temperatura adecuada en el suministro del fuel oil permitirá mantener la viscosidad de éste dentro de un rango de trabajo imprescindible para su correcta atomización, que proporcione una combustión óptima.

#### Filosofía del control

Para adecuar la temperatura del fuel oil a su nivel requerido, se colocan a la salida de las bombas unos calentadores de vapor. Mediante la variación del caudal de vapor a través de los calentadores se conseguirá una mayor o menor transferencia de calor que hará controlable la temperatura del fuel oil ante variaciones en el caudal de suministro. El lazo sería un PI simple como el que se muestra en la Figura 5.19.

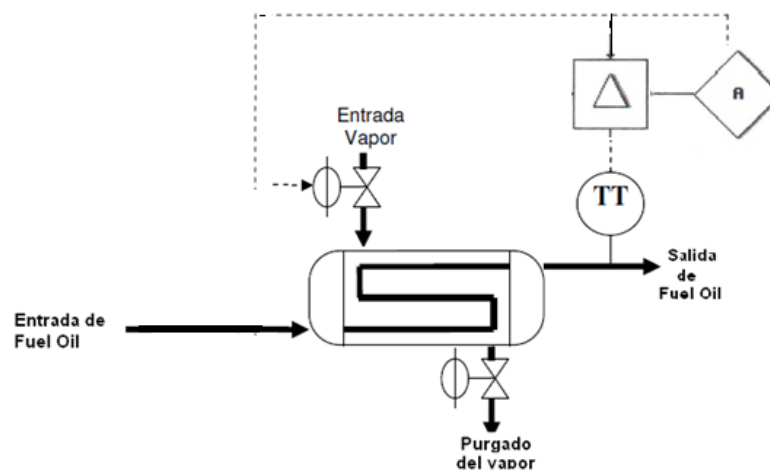


Figura 5.19 Control temperatura fuel oil  
Fuente: El autor.

Si la temperatura de vapor aguas abajo del calentador sube, la válvula de suministro de vapor cerrará en orden a reducir el caudal al calentador y reducir el calentamiento, y viceversa. En la figura 5.20 se muestra el diagrama en bloque de este control.

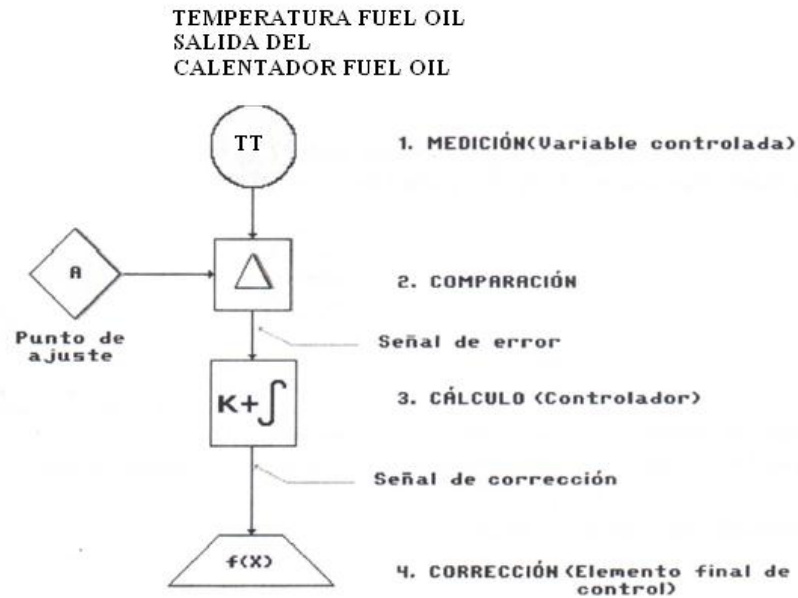


Figura 5.20 Diagrama de control de temperatura del fuel oil.

**Fuente:** El autor.

Pudiera darse el caso de que el suministro del combustible líquido sea variable en su composición de forma continua y que pueda modificar su viscosidad para una temperatura dada. En este caso, si el sobrecoste está justificado por el consumo o lo crítico de la instalación se puede usar un control PI+PI en cascada como el de la Figura 5.21, en donde la viscosidad será la variable primaria y la temperatura la secundaria. De esta forma, las variaciones de la viscosidad provocarán la modificación del punto de consigna de la temperatura necesaria para mantener la viscosidad requerida. Si la viscosidad baja la salida de su controlador bajará en orden a reducir la consigna del regulador de temperatura que cerrará la válvula de vapor, al igual que en el caso de que la temperatura supera la requerida.

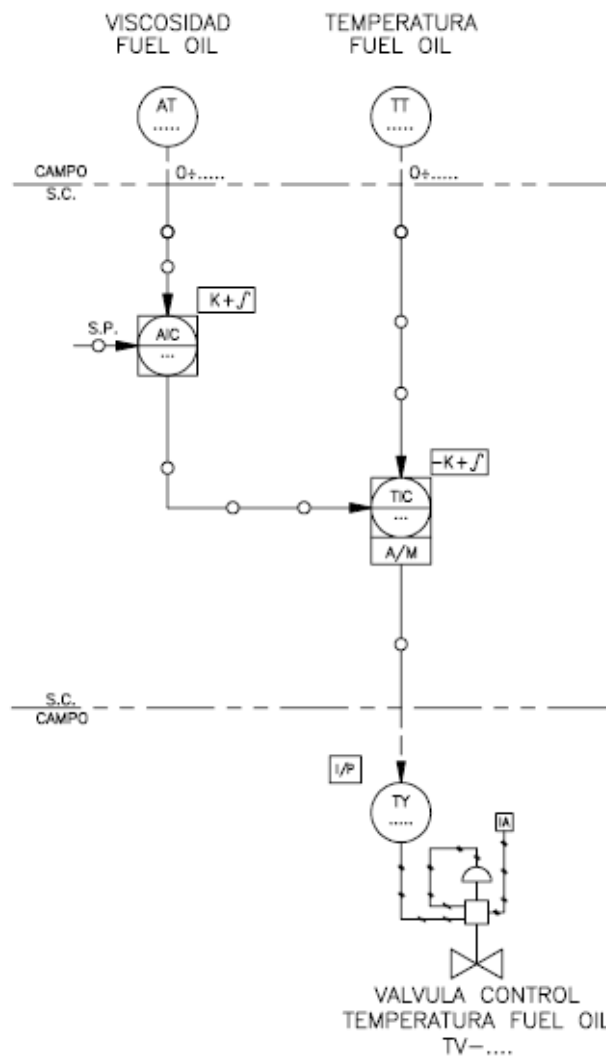


Figura 5.21. Control en cascada de temperatura del fuel oil.  
**Fuente:** Curso isa control y seguridades de calderas de vapor.

### 5.19 Control de presión del vapor de atomización

El objetivo de este lazo es mantener la presión del vapor de atomización en un valor adecuado. El mantener la presión adecuada permitirá asegurar que la atomización del combustible líquido sea correcta para el rango de funcionamiento de éste, lo que es imprescindible para una combustión óptima.

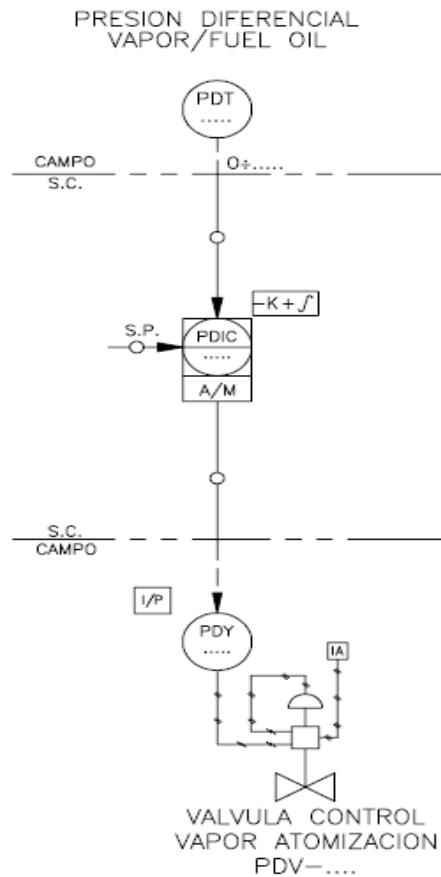


Figura 5.22 Control de presión del vapor de atomización  
**Fuente:** Curso isa control y seguridades de calderas de vapor.

Filosofía del control

Para poder mantener la presión del vapor en su punto de consigan se dispondrá de una válvula de control en la línea de aportación de vapor a los quemadores. Para una correcta atomización, normalmente, se debe mantener una presión diferencial vapor/fuel oil constante. Para ello utilizaremos un control PI simple como el que se indica en la Figura 5.22.

En algunas ocasiones podemos encontrarnos el caso de que la diferencial varía para las distintas cargas del combustible. En este caso, la consigna de presión vendrá dada en función de la presión del combustible<sup>7</sup> (Figura 5.23).

<sup>7</sup> De la Sen, A. Galvan, S. Bielza, J. Control y seguridades de caldera. Madrid: Sección española de ISA, 2000.

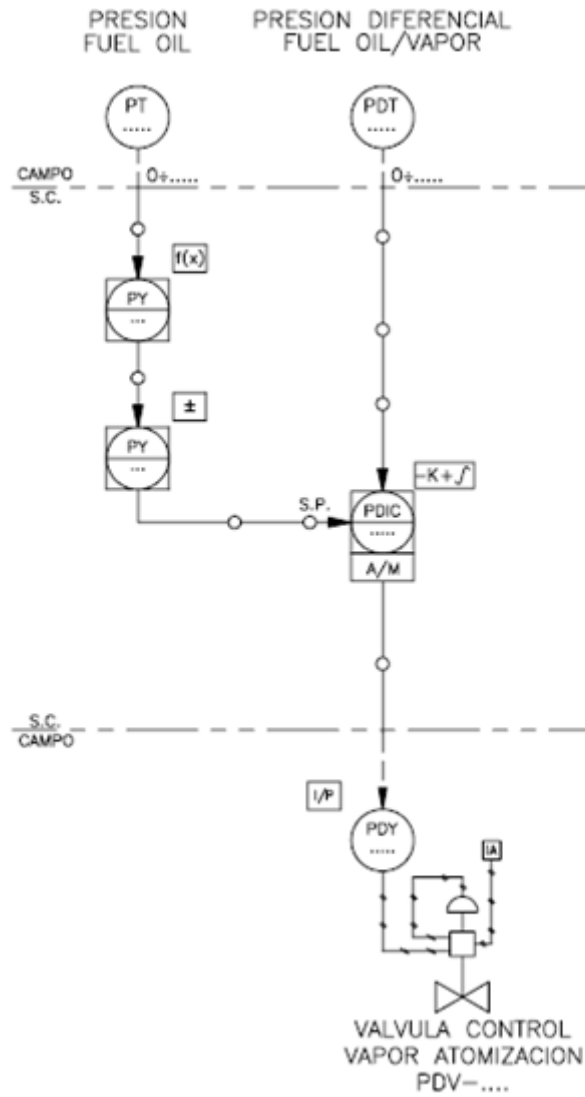


Figura 5.23 Control de presión del vapor con consigna variable  
**Fuente:** Curso isa control y seguridades de calderas de vapor.

## **CAPITULO 6**

### **OPERACIÓN DEL GENERADOR DE VAPOR EN PLANTAS TERMOELÉCTRICAS**

Una central termoeléctrica es una instalación que produce energía eléctrica a partir de la combustión de carbón, fuel oil o gas en una caldera.

#### **6.1 Descripción del proceso de las centrales termoeléctricas convencionales**

Para la generación de energía eléctrica se requieren varios procesos.

##### **6.1.1 Generador de vapor**

El generador de vapor, como su nombre lo indica, tiene la función de producir vapor a determinada temperatura y presión, para ser utilizado en la generación de energía mecánica eléctrica y para la alimentación a equipos de proceso.

Según (Andrade, 2011) comenta que, el generador de vapor tiene como destino transportar al agua, la energía en forma de calor de los gases producto de la combustión. El vapor de agua se lo provoca con las particularidades que se requiere para cada una de las etapas de la turbina (Alta, intermedia y baja presión).

El generador de vapor, recibe agua precalentada, muy cerca del punto de ebullición, del sistema de agua de alimentación, introduciéndose en el domo después de pasar por el economizador. En el domo se establece una circulación natural o forzada según sea la presión del generador de vapor.

Parte de la energía calorífica generada por la combustión del combustible es transferida al agua por las paredes de tubos subientes y la mezcla agua-vapor producida se lleva al domo para su separación. El vapor producido es sobrecalentado antes de llevarlo a la turbina.

El generador de vapor de una central termoeléctrica esta sometido a grades perturbaciones y variaciones de carga.

##### **6.1.2 Turbina de vapor**

En las centrales termoeléctricas de vapor se utilizan como máquinas motrices las turbinas de vapor. La turbina está acoplada a un generador eléctrico solidariamente que, finalmente, produce la energía eléctrica.

La turbina de vapor está dividida en etapas. Generalmente esta dividida en tres cuerpos: turbina de alta presión, turbina de media y turbina de baja. En cada una de ellas se recibe vapor en unas condiciones de presión y temperatura

determinadas. Se consigue con esta división un mayor aprovechamiento del vapor generado en caldera y se evitan problemas derivados de la condensación en las últimas etapas de la turbina.

El vapor sobrecalentado que proviene del generador de vapor, con las características requeridas, es llevado a la turbina y es conducido a la etapa de alta presión para la primera etapa de producción de trabajo por expansión de vapor, provocando su movimiento a gran velocidad, es decir, generamos energía mecánica.

El vapor de escape de la turbina de alta presión regresa nuevamente al generador de vapor con el propósito de recalentarlo y llevarlo a la turbina de presión intermedia para producir mas trabajo por expansión de vapor en las condiciones de recalentado.

El vapor de salida de la turbina de presión intermedia, es introducido en la turbina de baja presión para obtener el trabajo en esta última etapa de expansión de vapor.

### **6.1.3 Sistema de condensado**

El condensador recibe el vapor de escape de la turbina de baja, este tiene dos propósitos, uno de condensar este vapor para reingresarlo como agua de ciclo, y el otro para producir el vacío necesario a fin de elevar la eficiencia del ciclo. El enfriamiento del condensador se lo hace bombeando el agua de un estero en circuito abierto o bien usando torres de enfriamiento.

El sistema de condensado devuelve al ciclo el agua condensada y almacenada en el pozo caliente. Este pozo esta ubicado en la parte inferior del condensador: La bomba de condensado succiona el condensado de este pozo y lo envía a los calentadores de agua, estos calentadores utilizan como medio de calentamiento vapor de extracción de las etapas finales de la turbina de baja. Estos calentadores se les llama de baja presión porque el medio de calentamiento es vapor de presión baja de la turbina de baja.

El sistema de condensado termina dejando el agua caliente, proveniente de los calentadores de baja, en el Desareador el cual es en realidad otro calentador, que a diferencia de los anteriores es de contacto directo con vapor de extracción de la turbina de presión intermedia.

El Deareador o desareador además es el medio por el cual se extrae los gases incondensables fugados hacia adentro del sistema. Los incondensables se desechan por medio de una purga continua de vapor hacia la atmosfera.

### **6.1.4 Sistema de agua de alimentación**

El sistema de agua de alimentación tiene la función de proveer el agua que requiere el domo del generador de vapor por medio de las válvulas de control de agua de alimentación y de esta forma mantener el nivel de agua en el domo a pesar de los cambios en la demanda de vapor requeridos por la turbina. La bomba de agua de alimentación da al agua la presión requerida para vencer la presión del domo.

## 6.2 Procedimientos de operación normal

Los procedimientos de operación normal definen las rutinas de control e inspección de los equipos que conforman el proceso, donde además se analizan las variables operativas que requieren más atención y que permiten dar información del comportamiento de los equipos, ésta es la función primordial del personal operativo, además es el encargado de coordinar con el personal de mantenimiento las correcciones o mejoras en el proceso.

## 6.3 Puesta en marcha del generador de vapor

### Revisión antes del encendido

Antes de poner en marcha generador de vapor que ha estado fuera de servicio, se debe realiza una completa revisión interna y externa, básicamente lo siguiente:

1. Todos los pasos de gases y de aire deben estar libres de cualquier obstrucción.
2. Revisión interna de caldera: libre de objetos.
3. Cerrar todos los pasos de hombre
4. Verifique que la caldera esté totalmente desocupada, que los drenajes y los venteos de la caldera y el sobrecalentador estén abiertos.
5. Verificar que el virador esté en servicio.

### **6.3.1 Proceso de arranque**

- ❖ Llenar la unidad con agua de alimentación a un nivel ligeramente por debajo del nivel normal ya que el agua al calentarse crece en su volumen.
- ❖ Al inicio del llenado se debe verificar que el PH del agua dentro de ella sea el mismo del agua que entra, para cumplir con este requisito se debe extraer agua por un drenaje de fondo.
- ❖ El sistema de venteo de vapor en el punto mas alto de la caldera debe estar abierto para extraer aire de la caldera.
- ❖ Poner en servicio precalentador de aire.
- ❖ Poner en servicio ventilador tiro forzado
- ❖ Estando en servicio los dos equipos anteriores y confirmando que todas las válvulas de combustible estén cerradas, registros de aire del quemador estén abiertos o en posición de encendido se da inicio al barrido de caldera. Un ciclo de barrido de caldera es de unos 5 minutos y tiene como finalidad extraer con aire, todos los gases que puedan estar presentes en el hogar de la caldera evitando el riesgo de explosión durante la operación de encendido. En el proceso de barrido se maneja un flujo de aire de aproximadamente el 25% de operación a régimen normal.
- ❖ Verificar que el barrido de caldera haya finalizado
- ❖ Rearme de caldera
- ❖ Verificar que todos los drenajes y venteos de caldera estén abiertos
- ❖ Encender el primer Ignitor según permisivos de arranque y verificar la llama por el visor y la señal de piloto encendido en el panel local.



- ❖ Iniciar el calentamiento de la caldera progresivamente siguiendo la curva de calentamiento
- ❖ Drenajes y venteos se cerraran una vez que se haya desalojado todo el aire y condensado de la caldera y de acuerdo a lo indicado por el fabricante.
- ❖ Los ignitores se pondrán en servicio de acuerdo a lo requerido por la curva de calentamiento y presurización
- ❖ Poner en servicio equipos auxiliares
- ❖ Cuando exista producción de vapor auxiliar calentar la línea y poner en funcionamiento bomba principal de combustible fuel oil.
- ❖ Controlar el incremento de la temperatura y presión de la caldera modificando el flujo de aire y fuel oil en forma manual desde el panel local, hasta lograr un valor requerido que el control permita controlar en automático.
- ❖ Cuando se tenga condiciones de presión y temperatura de acuerdo a lo requerido por la Turbina, nos preparamos para rodar turbina que es el siguiente proceso
- ❖ La bomba de fuel oil quedara lista recirculando y se pondrá un quemador de fuel oil en servicio si las condiciones lo requieren durante el rodado de turbina.

### **6.3.2 Rodado de turbina**

Una vez que se tiene las condiciones de presión y temperatura del vapor en la salida de caldera y un vacío requerido en el condensador el operador esta listo para rodar turbina, para lo cual debe realizar lo siguiente:

- ❖ La turbina debe estar en grupo funcional virador que mantiene al turbo grupo en 16 rpm normalmente
- ❖ Poner en servicio sistema de vapor de cierre de turbina
- ❖ Prender el auto control de turbina
- ❖ Encender el botón grupo funcional de sistema de seguridades
- ❖ En ese momento el operador debe verificar en pantalla de control de turbina que setee automáticamente en 3600 rpm.
- ❖ Encendemos el programa de operación turbina y se da inicio al rodado de turbina
- ❖ El tiempo de rodado para calentamiento hasta llegar a la velocidad nominal de 3600 rpm dependerá si es arranque en frio, en tibio o en caliente.
- ❖ Cuando el turbogruppo llega a 3600 rpm nos preparamos para la sincronización.

### **6.3.3 Sincronización de la unidad**

Cuando la turbina esta rodando a 3600 rpm en condiciones estable procedemos de la siguiente manera:

- ❖ Cerrar interruptor de campo del generador y que quede en automático
- ❖ El control de voltaje debe estar en automático
- ❖ La maquina queda lista para conectarse a la red del sistema
- ❖ La conexión a la red del sistema eléctrico se efectúa cerrando el interruptor principal del generador eléctrico. Esta maniobra puede realizarse manualmente por el operador desde el sincronizador de

sala de control o bien en forma automática si el sistema dispone de un sincronizador automático.

### **6.3.4 Toma de carga de la Unidad**

Cuando se cierra el interruptor principal, empieza la transferencia de carga generada a la red del sistema nacional, estando previsto por el sistema de control que de manera automática se fije el punto de ajuste como demanda de generación. Se debe establecer en un valor de carga mínima establecido en cada central de generación.

### **6.4 Procedimientos de parada**

Para sacar de línea una planta termoeléctrica es necesario seguir ciertas recomendaciones y una secuencia lógica, para evitar fallas o daños en los equipos ya que la probabilidad de fallas en una máquina se incrementan en los arranques y paradas, por lo que es necesario poner mayor atención en estos aspectos operativos, a continuación se describen los pasos y recomendaciones a tomar en cuenta al sacar de línea la central térmica.

Una vez que se haya informado al centro de control de energía de la reducción de carga hasta salir de línea, se deberá indicar los motivos y el tiempo estimado de la parada.

1. Bajar carga eléctrica en el turbogenerador a razón de 1 Mw/min, evitando con ello variaciones bruscas en la presión de vapor y nivel de agua en la caldera.
2. Disminuir la presión de vapor en la caldera, de acuerdo con la reducción de carga en el generador.
3. Por cada 15 Mw de bajada poner fuera de servicio los quemadores, Esto variara un poco según sea la capacidad de la central termoeléctrica.
4. Cuando la demanda sea inferior al 40 % se debe verificar que se haga la transferencia automática de válvula de alta carga a baja carga, en centrales grandes se hace el cambio de bomba principal a la bomba auxiliar de alimentación de agua en la caldera, esto se hace debido a que la principal suministra mayor caudal y presión con lo cual a baja carga provoca oscilaciones de nivel en la caldera.
5. Cuando se tenga el fuel oil con bajo caudal, abrir válvula de recirculación al tanque de fuel oil.
6. De 30 a 20 Mw comenzar a cerrar extracciones de turbina. Esto variara un poco de acuerdo a la capacidad de la central termoeléctrica.
7. Con 5.0 Mw de carga en el turbogenerador hacer la transferencia de auxiliares a transformador de servicio, es decir el consumo eléctrico que antes de la reducción de carga era abastecida por el turbogenerador ahora será suministrada por el sistema de electrificación nacional.
8. Bajar a 0 Mw y dejar que el generador dispare por potencia inversa. Este procedimiento asegura que las válvulas de control de alta e intermedia presión son cerradas completamente y que no existe mas vapor suministrado a turbina.

9. Verificar que haya disparado caldera, que se hayan apagado los quemadores en servicio y que haya cerrado válvula principal de combustible y que hayan cerrado las válvulas neumáticas de combustible individual de cada quemador.
10. Verificar que no haya fuego en el hogar
11. Verificar que no haya aportación de agua hacia los atemperadores de vapor sobrecalentado y recalentado.
12. Observar las vibraciones de turbina durante el descenso de velocidad y durante el paso por las velocidades críticas.
13. Verificar que bombas auxiliares de aceite estén en automático
14. Verificar que a las 3240 rpm arranque la bomba de aceite de lubricación de turbina.
15. A una velocidad de turbina menor a 1000 rpm romper totalmente vacío abriendo válvula rompedora de vacío.
16. Sacar fuera de servicio eyectores de vacío del condensador.
17. Tan pronto como el vacío sea roto quitar vapor de cierres apagándose grupo funcional de vapor de cierres.
18. A las 100 rpm verificar que se activa el grupo funcional virador de turbina, arrancando la bomba de levantamiento de turbina virador.
19. Verificar que entra automáticamente virador de turbina cuando se detecte una velocidad de 0 rpm. Esto se hace cuando la turbina esté a punto de detenerse se enganchar turbina con motor de giro lento, a fin de mantener una rotación continua de 4 a 16 revoluciones por minuto (según requerimiento de turbina), por 12 horas, esto se hace por varias razones, evitar la deformación axial del eje de la turbina debido a las altas temperaturas de vapor al cual fue sometido, reducir la transferencia de calor del eje a las chumaceras evitando con ello el daño de las mismas.
20. Parar bomba de fuel oil. Y dejar en seguridad para evitar su arranque.
21. Llenar de agua caldera y parar bomba de alimentación, bloqueando el motor para evitar el arranque posterior.
22. Parar bomba de condensados
23. Rellenar caldera con bomba de emergencia.
24. Después de realizar barrido y ventilado lo suficiente el hogar parar ventiladores de caldera y bloquearlos para evitar su arranque posterior.
25. Verificar nivel de agua en caldera.
26. Embotellar caldera, esto significa cerrar todas las salidas de vapor y agua, además cerrar todos los registros en la caldera a fin de aislarla completamente, esto evitará el enfriamiento brusco de la tubería y disminuirá la demanda de agua.

## **6.5 Descripción del equipo para generación de electricidad**

### **6.5.1 Turbogenerador eléctrico**

“El turbogenerador (figura 6.1) es una máquina utilizada para la transformación de la energía térmica de un fluido, en energía eléctrica de corriente alterna, está compuesto por una turbina de vapor acoplada a un

generador eléctrico y equipos secundarios, excitatriz, transformadores, sistemas de lubricación y enfriamiento.”

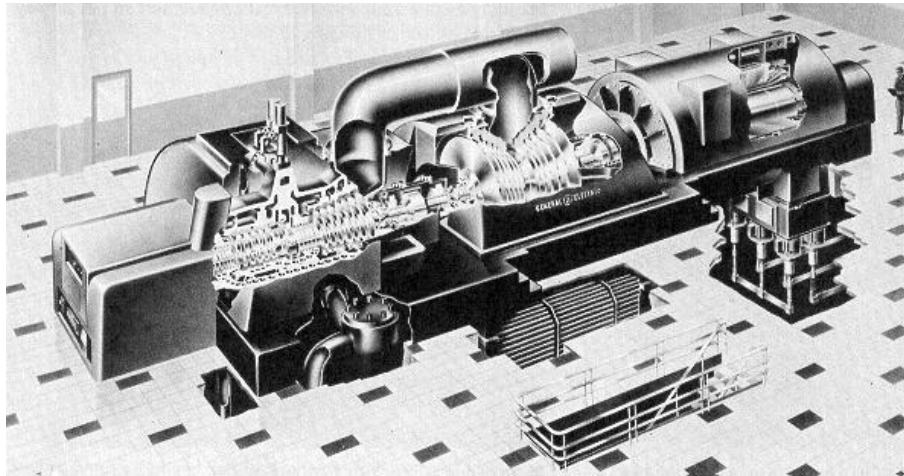


Figura 6.1 Turbogenerador eléctrico

Fuente: Pacheco, Jesús. Tutorial IEEE de protección de generadores síncronos

### 6.5.2 Turbina de vapor

Una turbina de vapor es una maquina que convierte la energía del vapor en trabajo mecánico. En una central termoeléctrica, este trabajo se emplea para mover un generador eléctrico que transforma el trabajo en energía eléctrica.

### 6.5.3 Principio de operación de la turbina

El vapor entra en una tobera en donde se expandiona, obteniéndose un chorro de vapor con gran velocidad, ver figura 6.2. La formación de un chorro de vapor y su conversión en trabajo ocurren en una combinación de pasadizos o conductos estacionarios llamados toberas o alabes impulsores, y en elementos giratorios llamados alabes o paletas móviles.

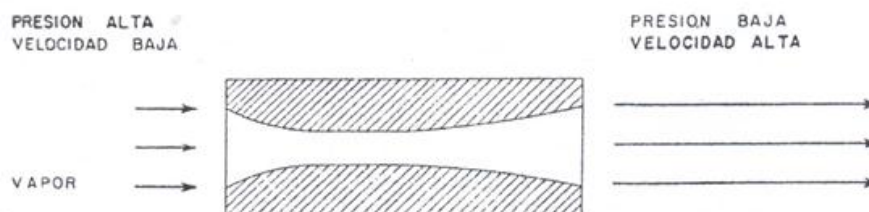


Figura 6.2 Tobera

Fuente: Manual de Introducción a Centrales Termoeléctricas de CFE, México.

### 6.5.4 Partes principales de la turbina

A continuación se describen las partes más importantes de una turbina de vapor con extracciones.

- ❖ **Rotor:** Parte móvil de la turbina que lleva montadas las ruedas con paletas o las toberas móviles (Las paletas y toberas móviles se conocen como alabes).
- ❖ **Toberas:** Transforman la presión del vapor en velocidad.
- ❖ **Carcaza:** Cubierta o envolvente de la turbina en donde van montadas las toberas fijas. La función es estructural para soportar el conjunto y para contener el vapor dentro de la turbina, haciéndolo pasar por las toberas y por último guiar el vapor hacia el condensador.
- ❖ **Sellos de vapor:** Los sellos de vapor son utilizados para eliminar fugas de vapor en el lado de alta presión y entre etapas de la turbina, también para evitar que el aire se introduzca en la sección de baja presión de la turbina; los sellos generalmente son de tipo mecánico o laberinto.
- ❖ **Chumaceras o cojinetes:** “Una chumacera es un elemento de máquina diseñado para soportar cargas a un eje que tiene movimiento relativo y deslizante, el cual consiste de un casco de acero, hecho en mitades, partido en el plano horizontal y revestido con babbitt a base de estaño, las mitades de la chumacera están atornilladas y aseguradas con tornillos prisioneros. Los cojinetes se designan en base a la dirección en la que se aplica la carga, siendo éstas radiales, axiales y mixtas.
  - **Los cojinetes radiales** se utilizan cuando la carga es perpendicular al eje de la turbina.
  - **Los cojinetes de empuje** tienen la función de soportar la fuerza resultante del empuje axial que actúa sobre el rotor del turbogruppo con dirección, ya sea lado generador o lado gobernador. El cojinete de empuje, se encuentra colocado entre la bomba principal de aceite y el cojinete de carga No 1.

Generalmente se construyen de zapatas que tienen en la superficie de contacto metal babbitt. Estas zapatas están diseñadas de forma tal que por el sistema de “amortiguamiento-unión”, son capaces de soportar un desalineamiento notable, sin necesidad de poner fuera de servicio la unidad. Es decir los cojines de empuje evitan el movimiento axial del rotor de la turbina más allá de los límites establecidos.

### 6.5.5 Sistema auxiliar de la turbina

Los sistemas auxiliares de la turbina, son mecanismos de protección y control de los equipos que conforman la turbina a continuación se describen los más importantes.

#### Sistema de regulación de velocidad

“La función principal del sistema de regulación de velocidad es la de mantener constante la velocidad establecida de la turbina, este regulador de velocidad es de tipo hidráulico y está mecánicamente conectado con las válvulas de control, el cual controla la velocidad del eje variando la apertura de las válvulas proporcionalmente a las variaciones de carga de la turbina. El mecanismo consiste esencialmente de tres partes, cada una de las cuales tiene una función definida, éstas partes son:

1. Gobernador, es un mecanismo de peso centrífugo, el cual se mueve en respuesta a los cambios en la velocidad de la turbina.
2. Válvula de aceite del gobernador, este mecanismo transforma los cambios en fuerza recibida de los pesos del gobernador a presión de aceite actuando sobre el *relay* servomotor.
3. Servomotor hidráulico, este mecanismo utiliza la presión de aceite como potencia motora para la operación de las válvulas de control del gobernador.

### **6.5.6 Sistema de lubricación y control**

Para el suministro de aceite la turbina utiliza un sistema de lubricación a presión, debido a las elevadas cargas de funcionamiento. El sistema de lubricación cumple tres funciones:

- Lubricar las partes en movimiento, suministrando una película de aceite a fin de reducir el desgaste y oxidación.
- Operación y control del sistema de gobernanza del turbogenerador.
- Actuar como un agente transportador de calor y evacuarlo en un sumidero.

## **6.6 Generador eléctrico**

Los generadores sincrónicos o alternadores son máquinas sincrónicas que se utilizan para convertir potencia mecánica en potencia eléctrica de corriente alterna a un voltaje y frecuencia específicos, el término sincrónico se refiere al hecho de que la frecuencia eléctrica de ésta máquina está atada o sincronizada con la velocidad de rotación de su eje. El principio fundamental de operación de los generadores sincrónicos, es que el movimiento relativo entre un conductor y un campo magnético induce un voltaje en el conductor.

Una fuente externa de energía de corriente directa o excitadora se aplica a través de unos anillos colectores en el rotor. La fuerza del flujo, y por lo tanto el voltaje inducido en la armadura se regulan mediante la corriente directa y el voltaje suministrado al campo. La corriente alterna se produce en la armadura debido a la inversión del campo magnético a medida que los polos norte y sur pasan por los conductores individuales.

Desde el punto de vista de su construcción, tiene devanados tanto en el estator como el rotor. En la generalidad de las máquinas, y siempre en las de gran tamaño, la armadura está ubicada en el estator y en ella se tiene C.A. El campo que tiene C.C. para la excitación, consecuentemente con lo anterior, va ubicado en el rotor.

### **6.7 Descripción básica del generador síncrono.**

Las máquinas sincrónicas están constituidas por dos devanados independientes: el devanado inductor o de excitación alimentado por corriente

continua y el devanado inducido que es trifásico y está recorrido por corriente alterna. Para las potencias que se utilizan en los generadores de las centrales el inductor se sitúa en el rotor y el inducido en el estator. Ver figura 6.3

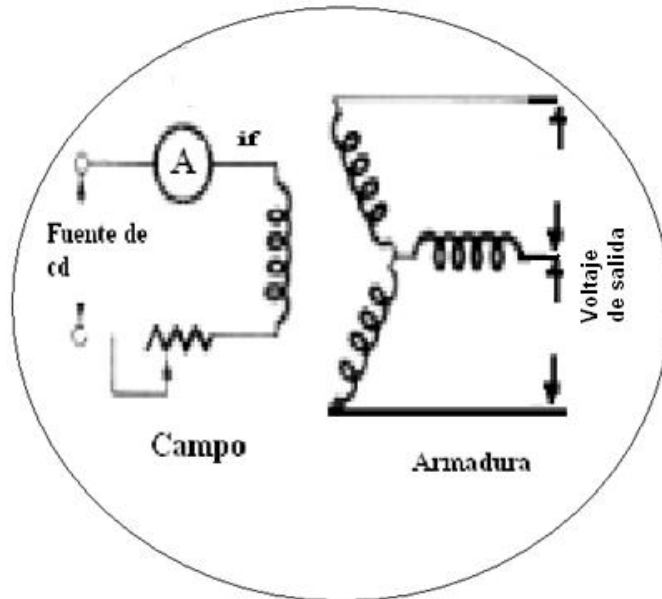


Figura 6.3 Esquema básico de un generador síncrono.  
Fuente: El autor

## 6.8 Partes principales del generador síncrono

### ❖ Estator (Armadura o inducido)

Es la parte fija del generador, está formado por un núcleo ranurado en forma circular, que el circuito magnético. Las ranuras del núcleo alojan en su interior las bobinas del estator, las cuales están aisladas entre sí y con respecto al núcleo. De las bobinas del estator salen las fases que conducen la energía eléctrica producida, al exterior del generador. Ver figura 6.4.



Figura 6.4 Estator  
Fuente: Central Trinitaria. (Cortesía)

### ❖ Rotor (devanado de campo, inductor)

Es un devanado distribuido colocado en ranuras arreglado de tal manera que produzca un campo senoidal correspondiente a un generador de 2 polos. Ver figura 6.5.

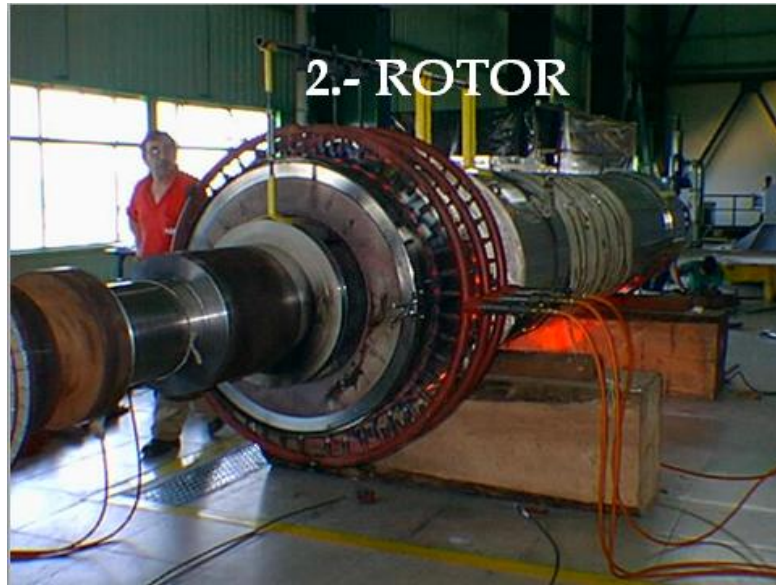


Figura 6.5 Rotor.

Fuente: Central Trinitaria. (Cortesía)

### ❖ Carcaza

Es una cubierta de acero de gran resistencia mecánica, diseñada para confinar en su interior el fluido de refrigeración, como puede ser gas hidrógeno o aire. La carcaza sirve de soporte al núcleo magnético del estator, a los enfriadores de hidrógeno o aire y a los dispositivos del sistema de aceite de sellos del generador, en caso de tenerlos. Ver figura 6.6.





Figura 6.6 Carcaza  
Fuente: Central Trinitaria. (Cortesía)

### Generalidades

En maquinas rotatorias las tensiones son generadas cuando:

- ❖ Al rotar mecánicamente las bobinas a travesan un campo magnético o
- ❖ Al rotar mecánicamente un campo magnético atraviesan un devanado de manera que su reluctancia varié con la rotación del rotor

### Ley de Faraday de la inducción electromagnética

Siempre que se produzca una variación de flujo magnético a través de un circuito, aparecerá en el mismo un a f.e.m. inducida. El valor de dicha f.e.m., esta dada por:

$$\text{f.e.m} = \frac{\Delta\phi}{\Delta t}$$

## **6.9 Sistema de excitación del generador**

El sistema de excitación es uno de los auxiliares más importantes en el generador, tiene la función de regular, producir y suministrar la corriente directa (corriente de excitación) que es alimentada al devanado de campo (rotor), con el fin de producir en él un campo magnético que interactúe con los devanados del estator y como resultado se induzca en estos una fuerza electromotriz (voltaje). La magnitud de la corriente alimentada al devanado de campo (corriente de excitación), será regida por el sistema de excitación en función del valor de voltaje de salida del generador.

## **6.10 Regulador automático de voltaje (AVR)**

Es la parte del sistema de excitación que se encarga de regular el voltaje de salida del generador en un voltaje determinado, sin que este se vea afectado por las variaciones de carga en el sistema eléctrico.

El regulador automático de voltaje realiza las siguientes funciones:

- Permite llevar al generador al voltaje adecuado para su sincronización, y mantenerlo estable cuando este se sincronice al sistema
- Una vez sincronizado el generador al sistema, permite controlar la generación de reactivos dentro de sus límites de operación, ayudando a mantener un voltaje adecuado y estable en el generador
- El regulador de voltaje mantiene el voltaje del generador dentro de los límites de seguridad, durante disturbios y condiciones anormales de operación, mediante limitadores y señales adicionales de control al sistema de excitación.

## **6.11 Sistema de enfriamiento del generador**

La capacidad del generador síncronico para producir potencia eléctrica está limitada primordialmente por el calentamiento dentro de la máquina, ya que

la resistencia eléctrica de los conductores de cobre se incrementa al subir la temperatura, con el consecuente daño de los devanados del generador y pérdidas de eficiencia. Por tanto es necesario evacuar el calor generado en el interior del generador, básicamente se tienen los siguientes tipos de enfriamiento:

- Generadores enfriados por aire
- Generadores enfriados por hidrógeno

## **6.12 Sistema de protecciones del generador**

La protección de generadores síncronos incluye la consideración de las condiciones de operación anormal más dañinas y severas que la protección de cualquier otro elemento del sistema de potencia. Un generador protegido adecuadamente requiere, la protección automática contra condiciones anormales dañinas.

Los relés de protección tienen como misión el detectar una situación de falla de la forma más precisa posible tanto en cuanto al tipo de falla como al lugar donde se produce, con el fin de limitar los daños sobre el elemento en defecto (generador, transformador, línea, etc.) así como las repercusiones sobre el resto de la red. La actuación de un relé de protección supone generalmente tanto la desconexión del elemento en defecto mediante la apertura del aparato de corte correspondiente, como la señalización del defecto.

Las principales características de los relés de protección se pueden resumir como:

- ❖ Fiabilidad, que se consigue generalmente recurriendo a un principio de funcionamiento lo más simple posible. El relé debe actuar frente a ciertas faltas, pero no debe actuar intempestivamente en otros casos.
- ❖ Sensibilidad, de forma que sean fiables, incluso ante la variación más pequeña detectable de la magnitud medida.
- ❖ Selectividad. El concepto de selectividad se aplica a la zona de protección, de forma que el relé más próximo al defecto es el único que debe actuar. También se aplica este concepto a la discriminación del tipo de defecto. Por ejemplo, un relé diferencial destinado a detectar sólo defectos internos no debe actuar nunca frente a un defecto externo a la zona protegida.

En la tabla 6.1 se puede ver una lista de los dispositivos de protección para el generador.

<b>Números de dispositivos relevadores</b>	
<b>Dispositivo</b>	<b>Función</b>
21	Relevador de distancia. Respaldo para fallas de fase en el sistema y en la zona del generador
24	Protección de Vols/Hz para sobreexcitación del generador
32	Relevador de potencia inversa. Protección antimotorización.
40	Protección de pérdida de campo
46	Protección de desbalance de corriente de secuencia negativa para el generador
49	Protección térmica del estator
51 GN	Relevador de sobrecorriente a tierra con tiempo
51 TN	Respaldo para fallas a tierra
51 V	Relevador de sobrecorriente de tiempo con control de voltaje. Respaldo para fallas de fase en el sistema y en el generador.
59	Protección de sobrevoltaje
59 GN	Relevador de sobrevoltaje. Protección de falla a tierra
60	Relevador de balance de voltaje. Detección de fusibles fundidos de transformadores de potencial
63	Relevador de presión del transformador
64	Protección de falla a tierra del campo
71	Nivel de aceite o gas del transformador
78	Protección de pérdida del sincronismo
81	Relevador de frecuencia. Protección de baja o sobre frecuencia
86	Relevador auxiliar de bloqueo y reposición manual
87 G	Relevador diferencial. Protección primaria de falla de fases del generador
87 T	Relevador diferencial. Protección primaria para el transformador
87 U	Relevador diferencial para la protección total del generador-transformador

Tabla 6.1 Dispositivos de protección del generador

**Fuente:** Pacheco, Jesús. Tutorial IEEE de protección de generadores síncronos

La figura 6.7 muestra un diagrama típico de funciones de relevadores del generador.

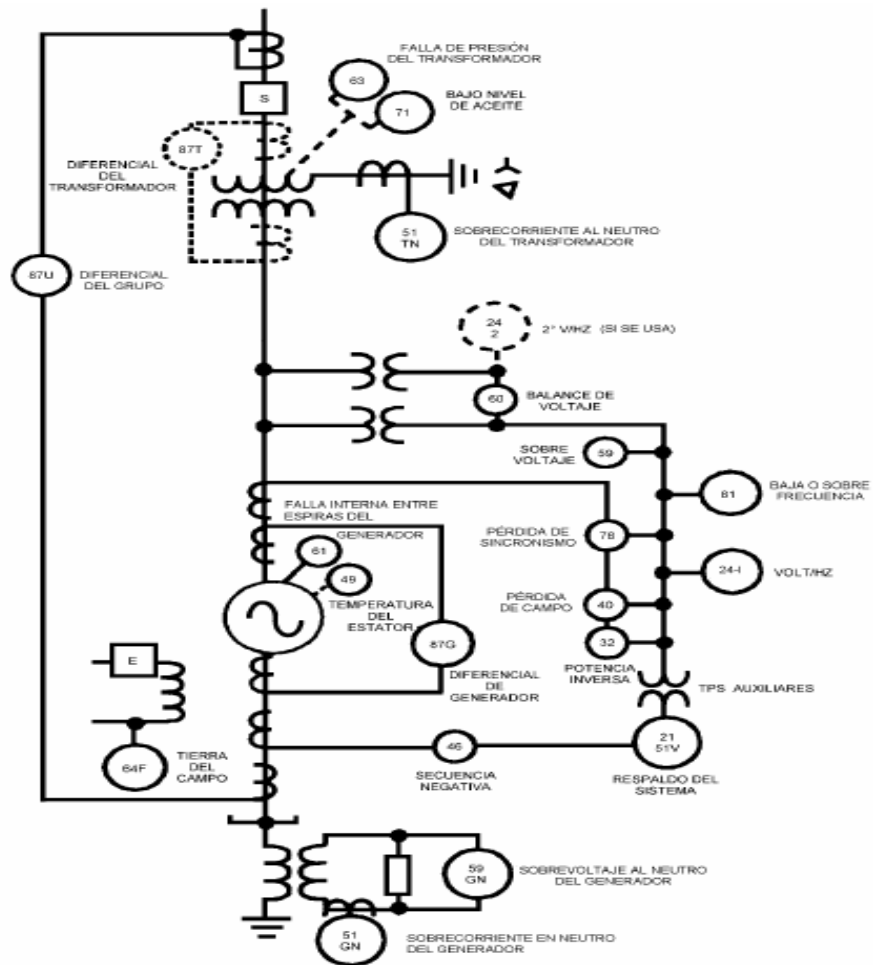


Figura 6.7 Protecciones típicas de generador- transformador

**Fuente:** Tutorial IEEE de protección de generadores síncronos. Comisión Federal de Electricidad .Unidad de Ingeniería Especializada

## CAPITULO 7

### TRATAMIENTO DE AGUA PARA CALDERAS

#### 7.1 Tratamiento de Agua para Generación de Vapor

Las aguas de ríos o esteros muestran contaminantes y para el uso en los sistemas de generación de vapor por lo tanto debe “tratarse” o acondicionarse. Esto se lo hace inicialmente en una planta de tratamiento de agua. El acondicionamiento completo consiste en un pretratamiento o “tratamiento externo” y el tratamiento “interno del agua de caldera”.

El agua químicamente pura, es un líquido raramente encontrado en tal estado. Esto es ocasionado porque el agua es casi un solvente universal, y prácticamente todas las sustancias son solubles en ella en cierto grado. Por ésta razón, el agua es fácilmente contaminada por sustancias que se ponen en contacto con ella.

El agua usada en una caldera debe estar libre de sustancias formadoras de incrustaciones y de productos de corrosión puesto que dañarían al equipo y sus accesorios. Este tipo de agua será obtenido por una purificación artificial, donde las impurezas serán eliminadas o serán transformadas en otros productos menos perjudiciales.<sup>8</sup>

El objetivo principal del tratamiento de agua para este fin, es evitar problemas de corrosión e incrustaciones, asegurando la calidad del agua de alimentación y del agua contenida en la caldera. El proceso de obtener agua sin mineral y otros residuos para cuidar la vida útil de una caldera es fundamental, ya que así se evita parar la generación del vapor, existe un ahorro y evita riesgos de accidentes.

#### 7.2 Tratamiento externo del agua

Según el manual de la empresa chilena (Thermal Engineering LTDA., 2007) señala que el Tratamiento externo del agua no es más que el proceso de tratamiento para producir agua de caldera. Existen diferentes métodos de tratamiento, ya sea utilizando uno de ellos o mixtos, se puede adecuar a cualquier suministro de agua para calderas. La conveniencia de los procesos se juzga por los resultados de calidad que causan y por los costos del vapor originado. Es común el uso de sistemas de desalinizadores y desmineralizadores en plantas de tratamiento de agua para calderas de centrales térmicas.

#### 7.3 Tratamiento interno del agua

Se realiza sobre el agua dentro de la caldera y sobre el condensado de retorno, usando productos químicos que reaccionan con los indeseables del agua. Este tratamiento interno es un complemento del tratamiento externo y

---

<sup>8</sup> Chapa, Francisco. “Corrosión e Incrustación en Tuberías”. Universidad autónoma de nuevo León. Facultad de Ingeniería Civil.

maneja contaminantes o impurezas que entran a la caldera, el grado de concentración de estas impurezas depende de las clases de tratamiento externo aplicado y se mide generalmente según los siguientes parámetros: pH, alcalinidad, dureza, sílice, cloruros, CO<sub>2</sub>, hierro y oxígeno.

#### **7.4 Parámetros Tratamiento de Agua**

Según el ingeniero (Oelker, 2007) comenta que, los principales parámetros implicados en el tratamiento del agua de una caldera, son los siguientes:

- El potencial de hidrógeno pH, que constituye las particularidades ácidas o alcalinas del agua, por lo que su control es esencial para prevenir problemas de corrosión (bajo pH) y depósitos (alto pH).
- Endurecimiento. La dureza del agua mide la cantidad de iones de calcio y magnesio presentes en el agua, los que benefician la formación de depósitos e incrustaciones difíciles de remover sobre las superficies de transferencia de calor de una caldera.
- Oxígeno. Siempre causa la corrosión de los elementos metálicos de una caldera. La presión y temperatura acrecientan la velocidad con que se produce la corrosión.
- Hierro y cobre. El hierro y el cobre crean depósitos que dañan la transmisión de calor. Se pueden manipular filtros para revolver estas sustancias.
- Dióxido de carbono. Al igual que el oxígeno, ayuda a la corrosión. Este tipo de corrosión se muestra en forma de ranuras y no de protuberancias como los resultantes de la corrosión por oxígeno. La corrosión en las líneas de retorno de condensado habitualmente es producida por el CO<sub>2</sub>. El desgaste ocasionado por el CO<sub>2</sub> sucederá bajo el nivel del agua y puede ser reconocida por las ranuras o canales que se crean en el metal.
- Aceite. El aceite beneficia la formación de burbujeo y como consecuencia el acarreo al vapor.
- Fosfato. Se utiliza para controlar el pH y dar defensa contra la dureza.
- Sólidos disueltos. Los sólidos disueltos la cantidad de sólidos (impurezas) diluidas en el agua.
- Sólidos en suspensión. Los sólidos en suspensión representan la cantidad de sólidos (impurezas) presentes en suspensión (no disueltas) en el agua.
- Secuestrantes de oxígeno. Los secuestrantes de oxígeno corresponden a efectos químicos (sulfitos, hidrazina, hidroquinona, etc.) manipulados para revolver el oxígeno residual del agua.
- Sílice. La sílice presente en el agua de suministro puede formar sedimentos duros (silicatos) o de muy baja conductividad térmica (silicatos de calcio y magnesio).
- Alcalinidad. Constituye la cuantía de carbonatos, bicarbonatos, hidróxidos y silicatos o fosfatos en el agua.
- Conductividad. La conductividad del agua admite registrar la cantidad de sales (iones) disueltas en el agua.

## 7.5 Incrustaciones

(Thermal Engineering LTDA., 2007) Además señala que, las incrustaciones afectan a depósitos de carbonatos y silicatos de calcio y magnesio, formados debido a una excesiva concentración de estos componentes en el agua de alimentación y/o regímenes de purga insuficientes.

La presencia de incrustaciones en una caldera es especialmente grave debido a su baja conductividad térmica y actúa como aislante térmico, provocando problemas de refrigeración de las superficies metálicas y puede llegar a causar daños por sobrecalentamiento.

En zonas de alta transferencia de calor se presentan las incrustaciones, ya que existe una alta evaporación y una elevada temperatura, lo cual aumenta la concentración de sólidos disueltos. La presencia de incrustaciones en las áreas de transferencia de calor causa problemas de eficiencia, esto hace que disminuye la transferencia de calor por su característica aislante; además, se tiene un aumento de la temperatura del tubo que puede producir una posible falla o rotura del mismo.

## 7.6 Corrosión y sus Efectos

La corrosión es el segundo problema después de la formación de incrustaciones relacionado con la calidad de agua de calderas. La corrosión es un desgaste y desprendimiento del material como consecuencia de una acción química en una caldera, usualmente producida por la presencia de gases disueltos contenidos en el agua como el CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> o algún ácido. Las principales causas de corrosión son:

- 1.- Acidez relativa del agua de caldera.
- 2.- Presencia de oxígeno disuelto en el agua de caldera.
- 3.- Acción electrónica.

Las condiciones ácidas en el agua de calderas normalmente son el resultado de reacciones químicas, siendo las sustancias formadoras de ácido:

La presencia de oxígeno promueve la corrosión del metal por dos vías:

1. La presencia de O<sub>2</sub> libre en el agua de caldera, formado a medida que aumenta la temperatura del agua en la caldera, produce un ataque de picado sobre el metal de la caldera. El O<sub>2</sub> se une con el metal de la caldera produciendo óxido de hierro. El investigador (Oelker, 2007) comenta que, las consecuencias de este tipo de corrosión son protuberancias de color negro, los que se crean sobre la zona de corrosión, tal como se aprecia en la figura 7.1.



Figura 7.1 Corrosión por oxígeno.  
**Fuente:** (Thermal Engineering LTDA., 2007)

La corrosión producida por la acción del oxígeno disuelto en el agua, esta puede producirse también cuando la caldera esta sin operar y el aire ingresa (oxígeno) a su interior.

(Thermal Engineering LTDA., 2007) Por eso recomienda que, la prevención de la corrosión por oxígeno se obtiene mediante una adecuada desgasificación del agua de alimentación y la mantención de un exceso de secuestrantes de oxígeno en el agua de la caldera.

2. Actúa como catalizador ayudando a otros elementos corrosivos del agua de caldera a reaccionar con el metal o acelera la reacción.

La corrosión de tipo  $O_2$  se evita externamente mediante el uso de desaireadores e, internamente mediante el uso de productos químicos que se apoderan del oxígeno, tales como el sulfito sódico que reacciona con el  $O_2$  disuelto para formar sulfato sódico, suele usarse en calderas de hasta 1800psi; y la hidrazina que reacciona con parte iguales de  $O_2$  para producir  $N_2$  y agua.

La reacción de la hidrazina con el oxígeno a bajas temperaturas ha dado resultado en plantas de alta presión utilizando éste producto químico sólo para apoderarse del  $O_2$ .

En calderas de alta presión también es necesario controlar la concentración de sílice en el agua mediante análisis automático, la sílice es firme y el más difícil de eliminar de todos los minerales disueltos.

El retorno de condensados es un medio de ahorrar combustible, pero el condensado puede tener productos corrosivos de la tubería de vapor y condensado, que pueden formar depósitos altamente aislantes en la superficie de la caldera. Debe utilizarse un estricto control de la corrosión en la línea de vapor y de retorno para limitar éste lodo; los atacantes más comunes de los sistemas de condensado don el  $O_2$  y el  $CO_2$  disueltos que encuentran su camino en el sistema de vapor.



## CAPÍTULO 8

### EFICIENCIA E IMPACTO AMBIENTAL EN CALDERAS

#### 8.1 Eficiencia

Una medida de que tanto la caldera aprovecha el poder calorífico del combustible para la transformación del agua en vapor, se tendrá mayor eficiencia cuando se tenga una combustión completa dentro del hogar de la caldera. Una combustión incompleta resulta en una eficiencia pobre y mayores costos.

La caldera es un equipo donde se transfiere la energía obtenida en la combustión de un combustible a un fluido de trabajo.

#### 8.2 El problema energético

Según la (Agencia Andaluza de la Energía, 2011) señala que el problema energético y medioambiental existente a nivel mundial, que se manifiesta a través de un horizonte finito y cercano para los combustibles no renovables y el calentamiento del planeta a través del efecto invernadero, ha llevado a las diferentes administraciones a implementar políticas energéticas dirigidas a fomentar el uso racional de la energía y la eficiencia energética. Están presentadas y redundan en un beneficio para el medioambiente y para la economía nacional, pues hay ahorro en la factura y se quema menos petróleo. Ver un esquema del problema energético, en la figura 8.1.

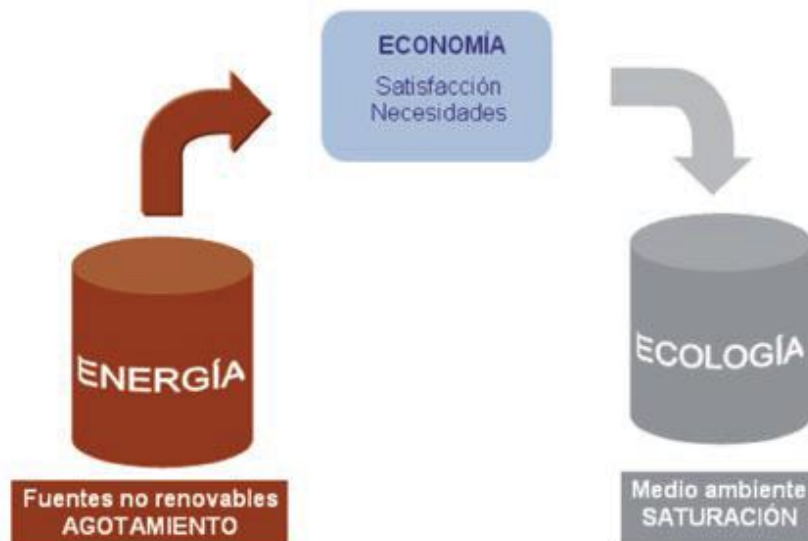


Figura 8.1 Esquema resumen del problema energético

Fuente: Agencia Andaluza de la Energía. "Metodología para la elaboración de auditorías energéticas en la industria"

Así, la estrategia global y local en el ámbito energético a desarrollar en cualquier país o región, debe primar la eficiencia energética, por su efecto favorable sobre el medio ambiente y su incidencia en la macroeconomía del país y en la economía de los usuarios.

El análisis de eficiencia energética requiere la realización de balances de materia y energía en los sistemas o equipos, calculando el rendimiento y valorando las pérdidas energéticas que tienen lugar.

### 8.3 Balance de masa

El balance de masa en equipos de generación de energía térmica, permite conocer los caudales y composición de los elementos de la reacción que tiene lugar en ellos. Será el paso previo al balance de energía y cálculo de rendimientos. Además, servirá para el dimensionado de los equipos auxiliares, como son: Ventiladores, quemadores, chimeneas. También permitirá establecer un control sobre aquellos parámetros que afectan a la combustión.

La composición elemental del combustible representa los pesos de cada elemento que forman parte del combustible: C, H, O, N, H<sub>2</sub>O y cenizas, expresados en kilogramos de cada uno de ellos por kilogramo de combustible.

### 8.4 Balance de energía

En aplicación del primer principio de la termodinámica, se establecen los balances de calor como la igualdad entre la suma de los calores entrantes, más los calores netos de la reacción, y la suma de los calores salientes, las corrientes que intervienen se encuentran señaladas en el esquema de la figura 8.2 que se muestra a continuación:

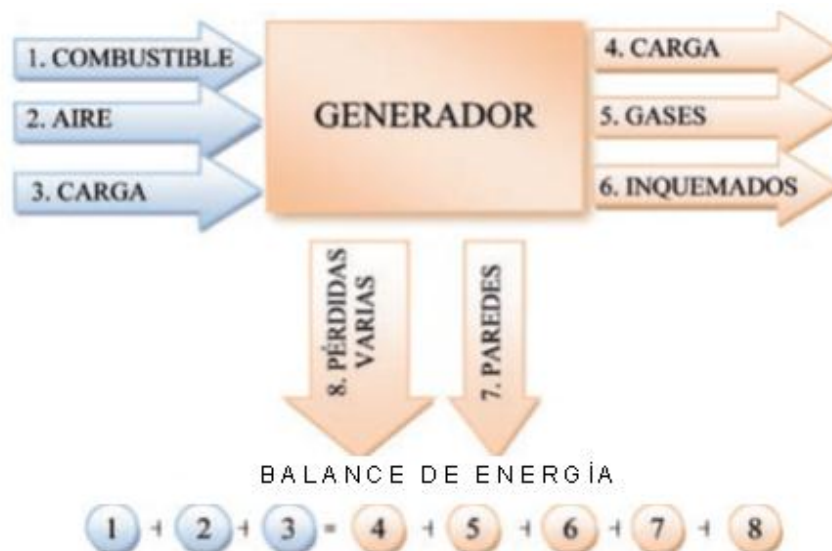


Figura 8.2 Esquema de corrientes para el balance de energía

Fuente: Agencia Andaluza de la Energía. "Metodología para la elaboración de auditorías energéticas en la industria"

La generación de energía térmica, a través de la combustión en calderas, hornos y secaderos, tiene asociadas una serie de pérdidas, tal y como se muestra en la siguiente figura, que son las siguientes: Pérdidas por inquemados, pérdidas por paredes y pérdidas en gases.

## 8.5 Fundamentos de la combustión

Se entiende como combustión la reacción rápida de oxidación que tiene lugar entre el combustible y el oxígeno del aire y en la que se libera una gran cantidad de calor.

Los combustibles están compuestos fundamentalmente por carbono, hidrógeno y azufre, junto con pequeñas trazas de otros elementos. Pueden estar en forma sólida, líquida o gaseosa, el aire, aparte del oxígeno, contiene cantidades importantes de nitrógeno (79%). El nitrógeno no tiene ningún papel activo en la combustión.

Se dice que la combustión es completa cuando todos los productos resultantes de la reacción están en el máximo grado de oxidación posible. Cuando se aporta el oxígeno (o aire) en la cantidad estrictamente necesaria para la combustión completa del combustible, esta se denomina combustión estequiométrica. Ver figura 8.3.

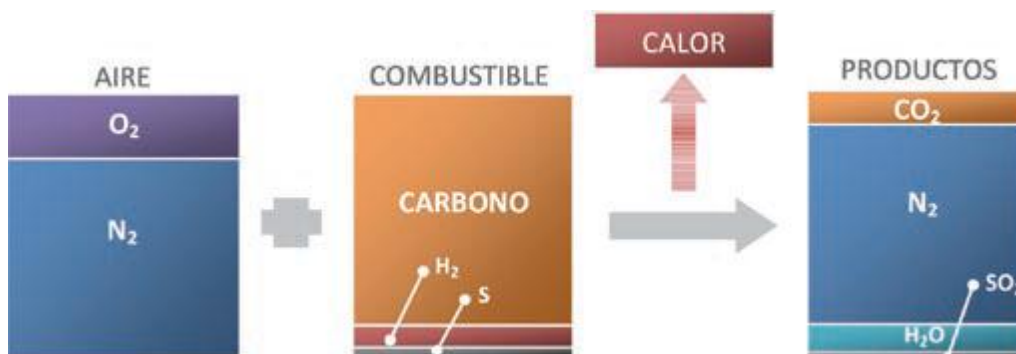


Figura 8.3 Combustión completa y estequiométrica

Fuente: Agencia Andaluza de la Energía. "Metodología para la elaboración de auditorías energéticas en la industria"

En la práctica, se trata de conseguir combustiones completas y para ello se aporta un exceso de aire para favorecer la reacción de combustión.

La (CONAE, 2007) indica al respecto, que para lograr una buena eficiencia de la caldera es obligatorio controlar, con suficiente precisión, el importe o cantidad de aire que se proporciona al proceso de la combustión:

El ingeniero (Pando, 2007) recomienda seguir el siguiente procedimiento:

- ❖ Excesivo aire comprimirá la temperatura del hogar y empujara una buena parte de calor útil.
- ❖ Escaso aire causará una combustión inconclusa, se dispersará por la chimenea cuantioso combustible sin quemar y se producirá humo. Sin embargo, en la práctica, existe un buen número de obstáculos para obtener una combustión completa (estequiométrica):
- ❖ Algunas de las moléculas de oxígeno se combinarán con moléculas de nitrógeno para formar óxido de nitrógeno (Nox).

Para asegurar una combustión completa se necesita suministrar una cantidad extra de aire o “exceso de aire”. Esto tiene su efecto sobre la eficiencia de la caldera.

## 8.6 Método para calcular la eficiencia de caldera

Existen dos métodos para calcular su eficiencia, el “método directo” y el método indirecto o de pérdidas”.

### 8.6.1 Método directo

Según el manual de (CONAE, 2007) que además está publicado en la página:[http://www.conuee.gob.mx/work/sites/CONAE/resources/LocalContent/3856/10/Calderas\\_02.pdf](http://www.conuee.gob.mx/work/sites/CONAE/resources/LocalContent/3856/10/Calderas_02.pdf) , al utilizarse el método directo, la eficiencia de una caldera se define como la relación entre la energía aprovechada en la transformación del agua en vapor, y la energía suministrada por el combustible. Se expresa normalmente en forma de porcentaje:

$$\text{Eficiencia de caldera} = \frac{\text{Calor que sale con el valor producido}}{\text{Calor suministrado por el combustible}} \times 100$$

### 8.6.2 Método indirecto

En el método indirecto o de pérdidas, la eficiencia se calcula restándole a 100 el valor de las pérdidas de calor; también se lo expresa como porcentaje:

Eficiencia de calderas = (100-pérdidas) %

Dentro de las pérdidas se consideran:

- ❖ Pérdidas de calor sensible en gases de combustión
- ❖ Pérdidas por combustible no quemado
- ❖ Pérdidas por radiación
- ❖ Pérdidas en calor en purgas y otros

## 8.7 Conceptos importantes

### Calor que sale (exportado) con el vapor

Este valor se calcula mediante el uso de “Tablas de vapor; para esto se necesita conocer:

- La temperatura del agua de alimentación
- La presión a la cual se está produciendo el vapor
- El flujo de vapor

### Calor suministrado por el combustible

Se calcula en base a la cantidad de combustible suministrado (m) y su poder calorífico (PC)

$$Q_{\text{suministrado}} = m \times PC$$

### Rendimiento

Es el porcentaje de calor contenido en el combustible que se traspaasa al vapor generado por la caldera al quemar dicho combustible.

### Factores para lograr un mejor rendimiento de la caldera:

- a. Mejorando la combustión y el sistema de quema del combustible
- b. Procurando que los gases que van a la chimenea fluctúen entre los 200 y 300°C para no afectar el tiro ni tener pérdidas exageradas de calor por los gases calientes
- c. Disminuyendo las pérdidas por radiación. Se recomienda usar un aislante térmico
- d. Utilizando economizadores y precalentadores de aire
- e. Manteniendo siempre limpia la caldera y los conductos de humo
- f. Realizando buenos tratamientos al agua de alimentación para evitar las incrustaciones.

## **8.8 Análisis de la eficiencia en calderas**

En el presente trabajo se da a conocer los principales parámetros que influyen en la eficiencia térmica de las calderas, así como también, el análisis de las alternativas existentes para reducir las pérdidas de calor de mayor importancia. Mediante gráficos y ejemplos prácticos se dan a conocer los ahorros de combustible que son posibles de conseguir.

La eficiencia de una caldera, dicho de manera simple, corresponde a la razón entre el calor absorbido (por el agua, vapor, fluido térmico, etc.) 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.

Dado que una caldera consume durante un año, por concepto de uso de combustible, varias veces el valor (capital) inicial de uno de estos equipos, los ahorros que son posibles de obtener con el incremento de solo un par de puntos de eficiencia son considerables.

Una gran mayoría o prácticamente la totalidad de las plantas que poseen calderas no tienen claridad de la importancia que tiene, en la reducción de los costos operacionales (ahorro de combustible), la operación de los generadores de vapor, fluido térmico o agua caliente en condiciones de máxima eficiencia.

## **8.9 Pérdidas de calor principales.**

A continuación se dan a conocer las pérdidas de calor principales que afectan a una caldera, los mecanismos existentes para reducir estas pérdidas y los potenciales ahorros de combustible (dinero) que son posibles de conseguir.

### 8.9.1 Pérdida de calor asociada al exceso de aire

El concepto de “exceso de aire” tiene relación con la cantidad de aire para la combustión que debe ser entregado por sobre el estequiométrico, para lograr una buena mezcla aire/combustible y con ello una buena combustión. La magnitud del exceso de aire requerido por una caldera varía principalmente de acuerdo al tipo de combustible y a la tecnología del quemador. En la tabla No. 1 se pueden observar valores referenciales para diferentes tipos de combustibles y quemadores.

COMBUSTIBLE	TIPO DE QUEMADOR	EXCESO DE AIRE MÍNIMO
Gas Natural	Atmosférico	65 %
	Tipo Anillo	45 %
	Boquillas	10 %
	Bajo exceso de aire	1 %
Petróleo	Atomizado por presión	15 %
	Copa rotativa	22 - 35 %
	Atomizado con vapor o aire	8 - 15 %
Carbón	Parrilla móvil	36 %
	Parrilla fija	36 %
	Pulverizado	8 %

Tabla 8.1: Datos referenciales de aire en exceso según la clase de combustible y quemador.

**Fuente:** Arnulfo Oelker Behn. “Análisis de eficiencia en calderas”

En general se sugiere trabajar con excesos de aire levemente superiores a los presentados en la tabla N°1, para compensar problemas de combustión asociados a variaciones en las propiedades del combustible y variaciones en el aire requerido para la combustión (presión atmosférica y temperatura).

El trabajar con excesos de aire inferiores a los recomendados también provoca disminuciones drásticas en la eficiencia de una caldera, debido a la combustión incompleta del combustible. Otros problemas asociados a la operación con excesos de aire insuficientes son la formación de depósitos al interior de la caldera (hollín) y la emisión de productos de la combustión con características explosivas y tóxicas.

La determinación del exceso de aire con el que está trabajando una caldera puede ser efectuada en forma sencilla, a través de la medición del contenido de O<sub>2</sub> o CO<sub>2</sub> y CO presente en los productos de la combustión.

Los procedimientos que deben realizarse para reducir las pérdidas de calor asociados a un exceso de aire diferente al requerido, tienen relación con: ajuste de la presión de combustible, ajuste de la presión del hogar, “swirl” en la entrada de aire al quemador, presión de atomización, temperatura del combustible, posición del quemador, espesor de la cama de combustible sólido, razón aire sobre y bajo parrilla, distribución de aire bajo parrilla, etc.

### 8.9.2 Pérdida de calor asociada a la temperatura de los productos de la combustión

La pérdida de calor asociada a los productos (gases) de la combustión (en chimenea) representa un al rededor de un 18 % para el caso de las calderas que utilizan gas y 12 % para el caso de las calderas que utilizan carbón y petróleo. Recordemos que tanto el hollín como las incrustaciones actúan como aislantes deteriorando el flujo de calor entre los productos de la combustión y el fluido contenido en la caldera. La acumulación de incrustaciones es especialmente crítica ya que trae consigo problemas de refrigeración de las superficies metálicas de una caldera, pudiendo provocar daños catastróficos por sobrecalentamiento.

Para el caso de una caldera, que a pesar de tener sus superficies internas y externas libres de hollín e incrustaciones, presenta una elevada temperatura de salida de los gases es recomendable considerar la instalación de sistemas recuperadores de calor en la salida de la caldera.

Entre estos sistemas recuperadores de calor se destaca el economizador (o precalentador de agua) y también el precalentador de aire; siendo este último utilizado generalmente utilizado en el caso de calderas que utilizan combustibles sólidos.

Para evaluar la instalación de un economizador u otro sistema de recuperación de calor, se deben tomar en cuenta las temperaturas mínimas admisibles de los productos de la combustión, para no alcanzar el punto rocío ácido (temperatura de condensación de ácidos contenidos en los productos de la combustión). Estas temperaturas mínimas admisibles son presentadas, junto a los puntos de rocío de los diferentes combustibles y las temperaturas mínimas del agua de alimentación, en la tabla 8.2.

COMBUSTIBLE	PUNTO ROCÍO ÁCIDO	TEMP. MINIMA EN CHIMENEA	TEMP. ADMISIBLE AGUA ALIMENTACIÓN
Gas Natural	65 °C	121 °C	100 °C
Petróleo Liviano	82 °C	135 °C	100 °C
Petróleo bajo azufre	93 °C	148 °C	104 °C
Petróleo alto azufre o carbón	110 °C	160 °C	115 °C

**Tabla 8.2** Puntos de rocío ácido, temperaturas mínimas recomendadas para los productos de la combustión y temperaturas admisibles del agua alimentación para prevenir corrosión en recuperadores de calor, de acuerdo al tipo de combustible.

**Fuente:** Arnulfo Oelker Behn. "Análisis de eficiencia en calderas"

### **8.9.3 Pérdida de calor en la purga**

Todos aquellos mecanismos tendientes a reducir la cantidad de agua/vapor eliminada a través de la purga de la caldera permitirán conseguir una reducción en las pérdidas de calor asociadas a la purga. Entre estos mecanismos figura un óptimo tratamiento de agua, el uso de purgas continuas (operadas por sistemas control, que incluyen la medición de las características del agua) y, para el caso de las purgas manuales, contar con operadores capacitados para mantener adecuados parámetros del agua de la caldera. Se estima que un adecuado tratamiento de agua y un buen manejo por parte de los operadores puede traer consigo ahorros de combustible cercanos al 1 %.

También es posible considerar la incorporación de sistemas recuperadores de calor en los sistemas de purga de una caldera. En la figura N°1 se observa un sistema de recuperación de calor acoplado a la purga de un conjunto de calderas.

El "vapor flash" generado en el estanque de expansión es conducido al estanque de almacenamiento de agua, como medio de precalentamiento, y el agua o condensado puede ser utilizado para el precalentamiento del agua de reposición en un intercambiador de calor (carcaza/tubos). Este sistema de recuperación de calor podría permitir ahorros de combustible del orden del 1 %. Estos sistemas de recuperación del calor proveniente de la purga son aplicables si el agua de reposición de una caldera supera el 5%.

### **8.9.4 Pérdidas de calor debido a no contar con un sistema de precalentamiento del aire requerido para la combustión**

El precalentamiento del aire requerido para la combustión es utilizado principalmente en calderas que utilizan combustibles sólidos (carbón, madera, biomasa, etc.), ya que, una mayor temperatura del aire de la combustión permite obtener una combustión más completa.

Al calentar el aire para la combustión hasta 260 °C es posible lograr incrementos en la eficiencia del orden de un 15 %. Se estima que con este tipo de sistema sería posible lograr un aumento en la eficiencia y con ello ahorros anuales de combustible cercanos al 1 %. Sin embargo, la mayor temperatura del aire para la combustión traerá consigo temperaturas de llama más altas y con ello un aumento en la formación de óxidos de nitrógeno.

### **8.9.5 Pérdidas de calor asociadas al uso de vapor en vez de aire comprimido para la atomización de combustible**

Aire comprimido o vapor son utilizados para lograr la atomización de los petróleos residuales. La energía requerida para obtener el aire comprimido es generalmente solo una pequeña fracción de la energía requerida para producir el vapor para la atomización. Se estima que la utilización de aire comprimido en vez de vapor, para la atomización de petróleos residuales, permite aumentar la eficiencia en un 1%.

La evaluación del tipo de medio (vapor o aire comprimido) utilizado para atomizar el petróleo debe considerar los costos asociados a la obtención del aire comprimido y las recomendaciones del fabricante del quemador.



### **8.9.6 Pérdidas de calor asociadas a la operación dinámica, puntos de máxima eficiencia y pérdidas de calor por radiación:**

Las pérdidas de calor asociadas a la operación dinámica de una caldera pueden ser considerables y tienen relación con un sobredimensionamiento de la caldera con respecto a la demanda de energía (vapor, agua caliente, etc.). La operación dinámica de una caldera se refiere a las variaciones de carga y a los ciclos de encendido y apagado que realiza. Lo ideal es que una caldera trabaje en forma continua no apagándose jamás.

La importante pérdida de energía asociada a los ciclos de encendido/apagado tiene relación con la pérdida de calor por radiación y la pérdida de calor asociada al aire que pasa a través de la caldera durante la ventilación que forma parte de cada secuencia de encendido de un quemador, así como también, el aire que pasa a través de la caldera cuando esta está detenido debido a la acción del tiraje natural del equipo.

Para reducir esta pérdida al máximo es sumamente importante definir correctamente el tamaño de la caldera requerida para cierto proceso productivo, o bien, ajustar el tamaño de las boquillas del quemador para asegurar un funcionamiento continuo.<sup>9</sup>

### **8.10 Comentarios.**

El análisis de las pérdidas de calor principales que afectan el rendimiento de una caldera, realizado en este estudio, pretende llamar la atención sobre los importantes ahorros de energía y combustible que pueden ser logrados con cuidados y regulaciones mínimas de los generadores de vapor de una planta.

En la actualidad la reducción de los costos operacionales y los ahorros de energía asociados deben ser considerados en las políticas y estrategias de las empresas que pretenden liderar los cada vez más competitivos mercados existentes en estos tiempos.

Las empresas nacionales deben tener claridad en cuanto a que sus competidores ya no se encuentran solo dentro de las fronteras de nuestro país, sino que principalmente provienen del extranjero, donde si existe una tremenda conciencia con respecto a los ahorros energéticos y a la disminución de los gastos operacionales.

### **8.11 Medidas para la mejora de la eficiencia energética**

A continuación se presentan las medidas de ahorro energético aplicables a las calderas, tanto si son empleadas para la generación de vapor como si se utilizan para el calentamiento de un fluido.

Las medidas de ahorro energético que se van a considerar son:

---

<sup>9</sup> Oelker Behn, Arnulfo. Análisis de eficiencia en calderas, Thermal Engineering Ltda.

- Ajuste de la combustión
- Economizadores en calderas
- Precalentamiento del aire de combustión
- Recuperación del calor de purgas
- Calorifugado de tuberías y tanques
- Eliminación de fugas de vapor
- Mantenimiento de purgadores
- Expansión del condensado de alta presión
- Recuperación de condensados
- Cogeneración con turbina de vapor a contrapresión
- Convertidores de frecuencia en ventiladores de combustión y bombas de alimentación en calderas
- Sustitución de calderas eléctricas por calderas de gas natural

La pérdida de rendimiento mayor en cualquier caldera se produce por el calor que se evacua con los humos, del 5 al 15%, según los casos. Cualquier sistema de recuperación del calor de los humos representará, por tanto, una sensible mejora en el rendimiento y una economía en el gasto de combustibles.

La mejora de rendimiento que se produce por la instalación de un receptor del calor de los humos oscila, normalmente y según los casos, entre el 1% y el 5% aproximadamente.

## **8.12 Protección del medio ambiente**

Otro aspecto que debemos mirar en el manejo de calderas es lo relacionado a la protección del medio ambiente y aquí si podemos aplicar en el extenso sentido de la palabra el concepto de desarrollo sostenido, es decir debemos y tenemos que generar riqueza y desarrollo social pero sin dejar deteriorado el medio que nos sirvió de plataforma para lograr ese desarrollo. Este es un compromiso universal y nosotros no podemos ser ajenos a esta inquietud que maneja la humanidad hoy día.

Es de nuestra responsabilidad la prosperidad que podamos disfrutar hoy día y es un cargo a nuestra conciencia el que generaciones venideras no puedan disfrutar de la calidad de vida que nosotros disfrutamos. Esta sentencia es de mayor significado cuando laboramos con equipos que utilizan energéticos primarios como son los energéticos fósiles, ya que su elevado consumo hoy día tiene abocada a la humanidad en una lucha sin cuartel para lograr preservar la calidad de vida actual, porque si seguimos maltratando el medio ambiente como hasta ahora lo hemos hecho muy seguramente nuestros hijos van a llamarnos a cuentas porque la herencia que les dejamos es lamentable.

De la transformación, transporte y uso final de la energía se derivan importantes impactos medioambientales, tanto de carácter local como global.

El abastecimiento energético, a partir de las energías fósiles, necesita siempre un proceso de combustión, bien en las centrales térmicas, para producir electricidad, o localmente, en calderas y motores de vehículos. Esta combustión

da lugar a la formación de CO<sub>2</sub>, principal gas del efecto invernadero, y a la emisión de otros gases y partículas contaminantes que dañan la salud.

### **8.13 Energía y medio ambiente**

Los conceptos de energía y medio ambiente se encuentran íntimamente relacionados: por una parte, la utilización de energías de origen fósil genera una serie de impactos sobre el medio ambiente, desde la extracción de la materia prima, hasta su transformación y aprovechamiento, y por otra, se trata de recursos, circunstancia preocupante desde el punto de vista de desarrollo de la sociedad.

Ciertamente, existen, hoy por hoy, alternativas reales a las fuentes de energía convencionales que, además de garantizar nuestro bienestar, contaminan en menor medida el medio que nos rodea.

Por otra parte, la utilización de energías no renovables debe ser objeto de evaluación e investigación, con el fin de conseguir mejoras de eficiencia energética en los diferentes procesos productivos.

Las políticas de gestión y ahorro de la energía deben propiciar, desde la concienciación de todos, un consumo más racional de energías de origen fósil y la sustitución progresiva por energías renovables.

### **8.14 Impacto ambiental de las centrales térmicas**

Los procesos de combustión en las centrales térmicas dan lugar a una alta emisión de residuos a la atmósfera (CO, CO<sub>2</sub>, SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, HCl, HfI).

El dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) contribuye al efecto invernadero y los óxidos de nitrógeno NO<sub>x</sub> generan lluvias ácidas.

En general, podemos decir que las más contaminantes son las térmicas de carbón, luego las de fuel y las menos contaminantes las de gas.

Además, el agua que se utiliza como refrigerante es devuelta al mar o ríos pero a mayor temperatura, es decir, con menor cantidad de oxígeno, y esto puede afectar a la vida animal y vegetal.

### **8.15 Desarrollo sostenible**

En la actualidad la mayor parte de la energía que consumimos proviene de fuentes no renovables. Estas, además de agotarse, contaminan.

Un desarrollo es sostenible cuando es capaz de satisfacer las necesidades actuales sin comprometer los recursos de las futuras generaciones. Talar árboles asegurando la repoblación es una actividad sostenible. Por contra, consumir petróleo no es sostenible ya que hoy en día no se conoce ningún sistema para crear petróleo. Hoy en día muchas de las actividades humanas no son sostenibles a medio y largo plazo tal y como hoy están planteadas.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En el presente trabajo se analizaron las calderas destinadas a trabajar en un ciclo de potencia, es decir en una central termoeléctrica. Al analizar el ciclo de Rankine se puede entender el proceso en general de un ciclo completo de vapor y a su vez obtener mejoras en el rendimiento del equipo. Al realizar un estudio de los componentes y sistemas de un generador de vapor nos fuimos familiarizándonos con el equipo de vapor.

El control de carga de una caldera se gestiona para mantener constante la presión y temperatura requerida por la turbina, pero las centrales termoeléctricas donde trabajan estas calderas se ven sometidas a disturbios debido a variaciones de carga y de generación del sistema, lo cual obliga a actuación rápida de los controles automáticos básicamente en control de combustión y control de nivel de agua en el calderín. Esto es posible gracias a los lazos de control de estos sistemas, es por esto que le dedicamos un capítulo exclusivo.

El ingeniero de procesos térmicos a vapor debe mantenerse al día en las nuevas tecnologías de instrumentación y control, puesto que día a día surgen opciones que ayudan a optimizar procesos.

En lo personal como operador de una central termoeléctrica observo que al estar la central de generación en funcionamiento y entregando energía eléctrica al sistema nacional, el operador cae en una rutina diaria de toma de lectura de parámetros operativos, es decir no recibe capacitación y puede llegar a olvidar conceptos indispensables. Un arranque de unidad requiere de conocer muy bien el proceso y respetar una secuencia establecida. En estas plantas se debe minimizar la cantidad de arranques, porque siempre una salida de unidad si no es bien controlada puede traer consecuencias y daño a equipos de la planta.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

### GENERALES

Agencia Andaluza de la Energía. (2011). *Metodología para la elaboración de auditorías energéticas en la industria*. Obtenido de [http://www.agenciaandaluzadelaenergia.es/sites/default/files/metodologia\\_xwebx1.pdf](http://www.agenciaandaluzadelaenergia.es/sites/default/files/metodologia_xwebx1.pdf)

Andrade, G. (Agosto de 2011). *METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE CALDERAS EN EL INGENIO CUATOTOLAPAN*. Obtenido de <http://cdigital.uv.mx/bitstream/123456789/30491/1/AndradeJuarez.pdf>

Bonilla. (2009). *Manual de Reglamento*. Obtenido de [http://catarina.udlap.mx/u\\_dl\\_a/tales/documentos/lim/bonilla\\_m\\_jc/capitulo9.pdf](http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lim/bonilla_m_jc/capitulo9.pdf)

Cedrón, M. (Enero de 2010). *Valvulas de seguridad*. Obtenido de [blogspot.com](http://calderasseguridad.blogspot.com):  
<http://calderasseguridad.blogspot.com/2010/01/valvulas-de-seguridad-para-calderas.html>

CONAE. (Mayo de 2007). *Eficiencia en calderas y combustión*. Obtenido de [slideshare.com](http://www.slideshare.net/ernestopando/eficiencia-en-calderas-y-combustion):  
<http://www.slideshare.net/ernestopando/eficiencia-en-calderas-y-combustion>

Fundación Asturiana de la Energía. (2009). *Energía y consumo*. Cajastur: Rigel. Obtenido de <https://secure.urkund.com/view/10394810-101303-904902#FY67EUIxDAR7efEFImz9aIWhhBcRMvTOEpwt30lefa77fT2etmTLUKKRGbVT6FGeJue7ShkZ6OD8HkG7UEU2IE2EwnE0mUREmUREI7khV+/W8IBaEY4elcpoZ0XL7kJqfY8iMPsRQ7sRIbscwpnRYMEBAA8D/fZynxR7UEBQgMEL3Upnb1Vh+BgTJbQx2a0rRmXt8f>

Navarro, G. (2010). *IMPLEMENTACION DE UN SISTEMA DE SUPERVISION Y CONTROL DE UNA CALDERA*. Obtenido de <http://guillermonavarro.wikispaces.com/file/view/OBJetivos%20y%20Justificacion.pdf>

Oelker, A. (2007). *TRATAMIENTO DE AGUA PARA CALDERAS*. Obtenido de

<http://norese.com/publicaciones/Tratamiento%20Agua%20Calderas.pdf>

Pando, E. (Mayo de 2007). *Eficiencia en calderas y combustión*. Obtenido de <http://www.slideshare.net/ernestopando/eficiencia-en-calderas-y-combustion>

Piña, G. (junio de 2008). *Diseño de un caldero pirotubular, simulacion del control y calibracion basado en el Analisis Orsat Mediante Labview*. Obtenido de Repositorio digital UPS: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/800>

Thermal Engineering LTDA. (2007). *Tratamiento de Agua para Calderas*. Obtenido de <http://norese.com/publicaciones/Tratamiento%20Agua%20Calderas.pdf>

Todocalderas. (Mayo de 2011). *Valvulas de seguridad para calderas*. Obtenido de <http://www.todocalderas.com.ar/articulo/19/valvulas-de-seguridad-para-calderas.html>,

Vidal, J. (2006). *INSPECCIÓN Y MANTENCIÓN DE CALDERAS MARINAS AUXILIARES*. Obtenido de <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2006/bmfciv649i/doc/bmfciv649i.pdf>

Villajulca, J. (Noviembre de 2009). *Cap 2.3 BMS para calderas industriales (Sistemas de Gestión de Quemadores) - See more at: <http://www.instrumentacionycontrol.net/cursos-libres/automatizacion/curso-control-de-calderas/item/142-cap-23-bms-para-calderas-industriales-sistemas-de-gesti%C3%B3n>*. Obtenido de [instrumentacionycontrol.net](http://www.instrumentacionycontrol.net): <http://www.instrumentacionycontrol.net/cursos-libres/automatizacion/curso-control-de-calderas/item/142-cap-23-bms-para-calderas-industriales-sistemas-de-gesti%C3%B3n-de-quemadores.html>

Villajulca, J. (11 de Diciembre de 2009). *Cap 3.6 Control de combustión en calderas*. Obtenido de [instrumentacionycontrol.net](http://www.instrumentacionycontrol.net): <http://www.instrumentacionycontrol.net/cursos-libres/automatizacion/curso-control-de-calderas/item/156-cap-36-control-de-combusti%C3%B3n-en-calderas.html>

## REFERENCIAS TESIS DE GRADO

1. Figueroa, A. (2008). Tendencias tecnológicas en el Control e Instrumentación de Calderas. Memoria para optar por el título de Ingeniero Mecánico, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos Guatemala, Guatemala.
2. Botia, J. Parra, M. (2005). Simulación y cuantificación del ahorro energético de una caldera pirotubular bajo control on-off y continuo. Memoria para optar por el título de Ingeniero Mecánico. Escuela de Ingeniería Mecánica, Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga.
3. Chan, E. "Diseño de procedimientos de operación de una planta termoeléctrica en un ingenio azucarero". Universidad de San Carlos de Guatemala
4. Méndez, F. "Control del sistema de combustión para una termoeléctrica convencional" Memoria para optar por el título de Ingeniero en Comunicaciones y Electrónica, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica Eléctrica, Instituto Politécnico Nacional, México, 2007
5. Fomperosa, Ramiro. "Sistema para encendido, calentamiento y presurización de un generador de vapor para una central termoeléctrica". Memoria para optar por el título de Ingeniero Mecánico Electricista, Facultad de Ingeniería Mecánica Eléctrica, Universidad Veracruzana, México, 2012.
6. Mezu, Jhonatan. "Diseño del lazo de control de combustión para la regulación del vapor vivo, en una caldera industrial". Memoria para optar por el título de Ingeniero Mecatrónico, Facultad de Ingeniería, Departamento de automática y electrónica, Programa Ingeniería Mecatrónica, Universidad Autónoma de Occidente, Santiago de Cali, 2012.
7. Andrade, Gustavo. "Metodología para la evaluación de la eficiencia de calderas en el Ingenio Cuatotolapan." Memoria para optar por el título de Ingeniero Mecánico Eléctrico, Facultad de Ingeniería, Universidad Veracruzana, México, 2011.
8. Figueroa, Arcenio. "tendencias tecnológicas en el control e instrumentación de calderas". Memoria para optar por el título de Ingeniero Mecánico, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala, 2008.

## INFORMES O ESTUDIOS SERIADOS

1. Ávila, Katherine. Manual Operadores de Caldera. 2013.
2. Babcock, G. Wilcox, S. Española. Manual de instrucciones y operación de una caldera radiante Tipo E.
3. Balaguera, Jorge. "Seguridad en calderas, tuberías y válvulas".
4. Centro de capacitación Celaya. Introducción a Centrales Termoeléctricas. CFE. México.
5. De la Sen, A. Galvan, S. Bielza, J. Control y seguridades de caldera. Madrid: Sección española de ISA, 2000.
6. Fenercon, Dirección General de Industria, Energía y Minas de la Comunidad de Madrid. Guía- básica-calderas-industriales eficientes. Madrid. 2013.
7. "Curso de combustión y puesta a punto de generadores de vapor de centrales termoeléctricas de C.F.E."

8. CFE. Fundamentos de teoría de control. Centro de Capacitación Celaya, México.
9. Creus Solé, Antonio. Instrumentación Industrial. 6ta. Edición. México: Editorial Alfaomega, 1998.
10. Enríquez, Gilberto; Elementos de Centrales Eléctricas. Tomo I; Limusa; México D.F.; 1982.
11. Grupo de Energía y Termodinámica. Instituto de Energía y Termodinámica, curso calderas. Universidad Pontificia Bolivariana. 2011.
12. Kohan, Anthony L. Manual de calderas. McGraw- Hill, 2000.
13. Mata, F. "Energía y medio ambiente. Propuestas para un desarrollo sostenible".
14. Oelker Behn, Arnulfo. Análisis de eficiencia en calderas, Thermal Engineering Ltda.
15. Ortiz, Ramiro. "Generación Térmica", 1ra Edición, Ediciones de la U, Bogotá. 2012.
16. Peñalba, Jordi. (2004). Modelado y Simulación de una Caldera Convencional. Departamento de Ingeniería Electrónica, Eléctrica y Automática. Universidad Rovira I Virgili.
17. Rodríguez, Julio. Energía. Empresa de Energía de Bogotá S.A. Universidad Nacional de Colombia.
18. Subdirección de conservación y Mantenimiento de la Subdirección General Medica. Guía Técnica de Operación y Mantenimiento de Generadores de Vapor. 2002.
19. Tutorial IEEE de protección de generadores síncronos. Comisión Federal de Electricidad .Unidad de Ingeniería Especializada.
20. [www.sisman.utm.edu.ec/libros/Calderas/](http://www.sisman.utm.edu.ec/libros/Calderas/) Libro calderas pdf-UTM