

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

EVALUACIÓN Y PUESTA EN FUNCIONAMIENTO DE UNA CALDERA MARCA CONTINENTAL, PIROTUBULAR, HORIZONTAL, DOS PASOS, PARA PRODUCCIÓN DE VAPOR SATURADO A 30 PSI.

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por el Br. Anaya O, Alfonso R.
Para optar al Título
de Ingeniero Químico

Caracas, 2010

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

EVALUACIÓN Y PUESTA EN FUNCIONAMIENTO DE UNA CALDERA MARCA CONTINENTAL, PIROTUBULAR, HORIZONTAL, DOS PASOS, PARA PRODUCCIÓN DE VAPOR SATURADO A 30 PSI

TUTOR: Prof. Armando Vizcaya.

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por el Br. Anaya O, Alfonso R.
Para optar al Título
de Ingeniero Químico

Caracas, 2010

Caracas, Octubre de 2010.

Los abajo firmantes, miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Química, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por el Bachiller Alfonso Anaya, titulado:

**EVALUACIÓN Y PUESTA EN FUNCIONAMIENTO DE UNA
CALDERA MARCA CONTINENTAL, PIROTUBULAR,
HORIZONTAL, DOS PASOS, PARA PRODUCCIÓN DE VAPOR
SATURADO A 30 PSI**

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudios conducente al Título de Ingeniero Químico, y sin que ello signifique que se hacen solidarios con las ideas expuestas por el autor, lo declaran APROBADO.

Prof. Alejandra Meza.
Jurado

Prof. Andrés Rosales
Jurado

Prof. Armando Vizcaya
Tutor académico

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Central de Venezuela, por darme la oportunidad de estudiar esta hermosa carrera, y por todas las cosas que aparte de ayudarme a superarme como persona me brindo, OBE, transporte, comedor.

A mi madre y mi padre que siempre creyeron en mí y como excelentes padres me apoyaron. Y toda mi familia en general, hermanos, primos tíos, sobrinos, amigos

A mi esposa y amiga, por su ayuda, consejos, perseverancia y comprensión.

A mis compañeros de estudios y amigos, Edward Fung, Guillermo Techeira, Ramón, Iralis, Carlos García, Blinky, Yaqueline, Tamara, que siempre estuvieron ahí para ayudarme.

A mis amigos de servicios básicos, María Meza, Dennis, Sr Jesús, Sr rojas, Sr Francisco, quienes me brindaron una mano y aun lo hacen cada vez que los necesito.

Al sr Armando Martínez Por su ayuda en este Trabajo Especial de Grado.

A mi tutor Armando Vizcaya, por compartir sus conocimientos conmigo tanto para la elaboración de este trabajo como al momento de darme clases durante la carrera.

A mi profesor y ahora amigo Johnny Vásquez, el autor intelectual del tema de esta tesis.

Y a todos los profesores que en su momento me dieron clases a lo largo de la carrera.

Anaya O., Alfonso R.

EVALUACIÓN Y PUESTA EN FUNCIONAMIENTO DE UNA CALDERA MARCA CONTINENTAL, PIROTUBULAR, HORIZONTAL, DOS PASOS, PARA PRODUCCIÓN DE VAPOR SATURADO A 30 PSI.

Tutor Académico: Prof. Armando Vizcaya.

Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Química. Año 2010, 82p.

Palabras clave: Calderas, generación de vapor, Instrumentación y control, tratamiento de aguas, transferencia de calor.

Resumen. Este trabajo se realizó en la sala de generación de vapor del Laboratorio de Operaciones Unitarios (L.O.U.) de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad Central de Venezuela, el cual tiene como objetivo principal evaluar y poner en funcionamiento la caldera pirotubular de 150 Bohp de capacidad, con la finalidad de reincorporar al cronograma aquellas prácticas que se habían dejado de realizar por la falta de vapor saturado.

Previo a la puesta en marcha de la caldera, se evaluó su estado general con la finalidad de determinar el motivo de la falla, para esto se realizó un prueba hidrostática que consistió en aumentar la presión dentro de la caldera para verificar si existían fugas. Al notarse la presencia de fugas en la caldera se tomaron acciones para corregir dichas fugas y se hizo condenando los tubos que presentaban fisuras.

Una vez corregidas las fallas mecánicas se procedió al encendido para luego realizar una evaluación al sistema de control, esta evaluación consistió en una serie de pruebas hechas a cada uno de los lazos de control, nivel, presión y llama. Luego de estas pruebas se procedió a arrancar la caldera por un lapso de una semana monitoreando su funcionamiento.

Basados en la seguridad y óptimo funcionamiento de la caldera se realizó un manual para el personal técnico del laboratorio, en el cual se explica a detalle la forma más segura para dar encendido a la caldera así como realizar mantenimiento preventivo y corrección de las fallas más comunes.

ÍNDICE DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I	2
FUNDAMENTO DE LA INVESTIGACION	2
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	2
1.2 ANTECEDENTES	3
1.3 OBJETIVOS	4
1.3.1 Objetivo General:	4
1.3.2 Objetivos Específicos:	4
CAPÍTULO II	5
MARCO TEÓRICO	5
2.1 TRANSFERENCIA DE CALOR	5
2.1.1 Definición	5
2.1.2 Mecanismos de Transferencia de Calor.....	5
2.1.3 Tipos de Flujo de Fluidos	8
2.1.4 Grupos Adimensionales.....	9
2.2 CALDERAS	12
2.2.1 Definición	12
2.2.2 Usos	13
2.2.3 Clasificación de las calderas.....	13
2.2.4 Partes de una caldera	16
2.2.5 Capacidad de producción de vapor de las calderas	18
2.3 TRATAMIENTO DE AGUA PARA ALIMENTACION DE CALDERA	20
2.3.1 Fuentes de Agua	20
2.3.2 Parámetros a evaluar en el Tratamiento de Agua	20
2.3.3 Problemas más Frecuentes.....	23
2.4 Equipos de Tratamiento de Agua	27
2.4.1 Suavizador	27

2.4.1.1 Resinas de Intercambio Iónico	28
2.4.1.2 Estructura física y química de las resinas	29
2.4.1.3 Reacción de intercambio iónico.....	30
2.4.1.4 Etapas del proceso de intercambio iónico en el suavizador	31
2.4.2 Desgasificador	34
2.4.3 Remoción del oxígeno por método químico.....	35
2.5 INSTRUMENTACION Y CONTROL EN UNA CALDERA.....	36
2.5.1Clasificación de variables	37
2.5.2 Control regulador y servocontrol.....	37
2.5.3 Estrategias de control.....	38
2.5.4 Componentes básicos del sistema de control.....	39
2.5.5 Válvulas de control	40
2.5.6 Controlador	41
CAPÍTULO III	42
METODOLOGÍA GENERAL.....	42
3.1- Evaluación técnica de la caldera pirotubular horizontal de dos pasos Continental.....	42
3.2.- Evaluar el sistema de tratamiento de agua de alimentación de la caldera.	42
3.3.- Evaluación de la instrumentación y del sistema de control de la caldera.	43
3.4.- Informe diagnóstico producto de la evaluación de la caldera.	44
3.5.- Manual de procedimientos para la puesta en funcionamiento de la caldera.	44
3.6.- Arranque y operación de la caldera.	44
CAPÍTULO IV.....	45
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	45
4.1.- Evaluación de la caldera.	45
4.2.- Evaluación de sistema de tratamiento de agua.....	47
4.3 Evaluación del sistema de control	48
4.4.-Arranque de la caldera	50

4.5- Manual de procedimientos para la puesta en funcionamiento de la caldera.....	53
CAPÍTULO V	55
CONCLUSIONES	55
CAPÍTULO VI.....	56
RECOMENDACIONES	56
CAPÍTULO VII.....	57
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	57
APÉNDICE	59

NOTACIÓN DE VARIABLES

A: Área, [L²]

C_p: Capacidad calorífica, [L²/θ²T]

F_f: Factor de forma, [adim]

h: Coeficiente de convección, [M/θ³T]

h_g: entalpia de vapor

h_f: Entalpia de liquido

k: Conductividad térmica, [ML/θ³T]

L: Longitud característica, [L]

LMTD: Diferencia de temperatura media logarítmica, [T]

Nu: Número de Nusselt, [adim]

Pr: Número de Prandtl, [adim]

Q: Flujo de calor, [ML²/θ³]

Q_c: Capacidad de Producción de vapor de la caldera

Re: Número de Reynolds, [adim]

r: Dirección radial

T: Temperatura

T₁: Temperatura del fluido caliente, [T]

T₂: Temperatura del fluido frío, [T]

u: Velocidad media, [L/θ]

SIMBOLOS GRIEGOS

σ: Constante de Stefan-Boltzmann, 0,1714x10⁻⁸ Btu/(h pie² °R⁴); o 5,6697x10⁻⁸ W/(m² K⁴).

ρ : Densidad, [M/L³]

μ : Viscosidad dinámica, [M/L θ]

SUBÍNDICES:

in: Entrada

out: Salida

ÍNDICE DE FIGURAS

		Pág.
Figura N°1:	Caldera pirotubular.....	14
Figura N°2:	Corrosión por oxígeno o pitting.....	24
Figura N°3:	Efecto de incrustaciones y flujo de calor en la temperatura del metal.....	26
Figura N°4:	Detalle de las esferas de resina de intercambio iónico.....	29
Figura N°5:	Solubilidad del oxígeno en función de la temperatura del agua.....	34
Figura N°6:	Efectos de corrosión en tubos de caldera.....	45
Figura N°7:	Tubos fisurados de la caldera	47
Figura N°8:	Estado de deterioro del manómetro principal.....	49
Figura N°9:	Trabajo de reparación en tuberías.....	51
Figura N°10:	Estado exterior de la caldera	75
Figura N°11:	Deterioro en cuerpo de la caldera.....	75
Figura N°12:	Estado interno de la caldera (puerta trasera).....	76
Figura N°13:	Estado del tren de gas.....	76
Figura N°14:	Grietas en registro de mano.....	77
Figura N°15:	Bomba manual tipo pistón.....	77
Figura N°16:	Presiones alcanzadas durante prueba hidrostática.....	78
Figura N°17:	Presostato accionado por ampolla de mercurio.....	78
Figura N°18:	Elementos incorporados al tren de gas.....	79
Figura N°19:	Presostato accionado por micro switch.....	79
Figura N°20:	Presencia de vapor en tuberías del LOU.....	80
Figura N°21:	Intercambiador de calor para realización de práctica.....	80

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla N°1: Requerimientos de agua de alimentación de la caldera (hasta 150 psi).....	22
Tabla N°2: Requerimientos agua dentro de la caldera (hasta 150 psi)...	23
Tabla N°3: Porcentaje de disminución de calor en función del espesor de las incrustaciones.....	27
Tabla N°4: Nivel en exceso de sulfito (SO ₃) en el agua de la caldera.....	36
Tabla N°5: Componentes de control sustituidos en la caldera.....	52
Tabla N°6: Componentes de control incorporados a la caldera.....	52
Tabla N°7: Resultados de análisis de humos de combustión.....	53

INTRODUCCIÓN

Este Trabajo Especial de Grado tiene como objeto desarrollar un estudio sobre el funcionamiento de los generadores de vapor, enmarcado particularmente en la Caldera Marca Continental, pirotubular, horizontal, dos pasos, del Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Escuela de Ingeniería Química, de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Central de Venezuela.

Para ello se realizó una evaluación preliminar, que permitió establecer el estado de la Caldera, determinar qué elementos deben ser reemplazados por deterioro y cuáles deben ser reemplazados para optimizar su funcionamiento. Garantizando de esta manera su puesta en marcha bajo los más altos estándares de seguridad. Siguiendo esta premisa se realizó un manual para el personal técnico del laboratorio, ya que ellos se encuentran a cargo de su funcionamiento y de darle mantenimiento preventivo y correctivo a la caldera.

Posterior al reemplazo de los elementos que se consideraron necesarios se realizaron ciclos de pruebas, a través de los cuales se detectó de manera oportuna fallas en la caldera. Luego de corregidas las fallas encontradas, la caldera fue puesta en funcionamiento, y para garantizar que se encuentra en óptimas condiciones se procedió a monitorear su funcionamiento por el lapso de una semana.

Dejándola en perfecto funcionamiento para la realización de prácticas en el Laboratorio de Operaciones Unitarias las cuales habían sido desincorporadas por falta de vapor saturado.

CAPÍTULO I

FUNDAMENTO DE LA INVESTIGACION

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad Central de Venezuela existe una caldera pirotubular, horizontal de dos pasos, marca Continental, a una presión de trabajo de 30 Psi de vapor saturado, con la finalidad de proveer de vapor a aquellos equipos de práctica y experimentación que lo requieran. En los últimos años, el costo del tratamiento de las aguas a utilizar en la generación del vapor, el mantenimiento de las partes de la caldera y la actualización de la instrumentación se han elevado a un punto tal que se hace difícil para la Escuela cumplir con estos requerimientos.

Por ello se propone realizar un exhaustivo estudio de las necesidades de tratamiento de las aguas a utilizar para la generación del vapor, llevando ello a la producción de los requerimientos que permitan la reparación o nueva adquisición de las columnas y resinas que permitan el intercambio iónico necesario para cumplir con el tratamiento. Igualmente se ha comprobado que existen fugas de agua en la caldera, lo que debe ser estudiado a profundidad a fin de garantizar que no existan grietas en el hogar ni en los tubos de humo debido a la corrosión y verificar el grado de incrustación que presenta la caldera en su interior, para evitar la posibilidad de accidentes que pongan en peligro la vida de los operarios. Por ello se realizará, además de las necesarias reparaciones de conexiones y empaques, una prueba hidrostática a la caldera según normas COVENIN 2217-84 (comisión Venezolana de Normas Industriales), análisis de combustión y pruebas para los diferentes lazos de control (nivel, presión, llama). Aunado a esto, los adelantos

ocurridos en los últimos años en la instrumentación y control de equipos de procesos requiere que en la Escuela se adelante un profundo estudio de esta nueva tecnología, que podría permitir en un futuro nuevos Trabajos Especiales de Grado que adelantarían la simulación de este equipo de manera dinámica. Esto permitiría a los estudiantes de la Escuela estudiar aprendiendo.

1.2 ANTECEDENTES

En este capítulo se realiza una breve descripción de las investigaciones que sirvieron como referencia para el presente Trabajo Especial de Grado, las cuales son descritas a continuación:

Medina V. Luis F., Zea A. Luis A. (2008). En este trabajo se determinaron las condiciones físico-químicas que favorecen el proceso de incrustación en superficies de hierro. Para esto se simuló agua de producción que cumpliera con la norma NACE TM0374 y se realizaron pruebas en un equipo operando a flujo continuo, variando las condiciones de pH, conductividad, temperatura y flujo. Se llegó a la conclusión que valores elevados de pH y temperatura, la presencia de sales disueltas en el agua sintética empleada y flujos poco turbulentos son condiciones que favorecen la formación de incrustaciones.

Rodríguez V. José R. (2006). Realizó un estudio sobre el principio de funcionamiento de las calderas de tubos de fuego como objeto de control automático. Se mostró que esta clase de calderas como objeto de control automático presenta un comportamiento dinámico difícil, con múltiples entradas y salidas y múltiples interrelaciones entre estas variables, así como significativas incertidumbres. Se fundamentó que la presión del vapor en el cuerpo de la caldera constituye una de las variables más importantes de esta clase de equipos, debido a que el control de la combustión se realiza mediante el control de la presión del vapor.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo General:

Evaluación y puesta en funcionamiento de una caldera marca Continental, pirotubular, horizontal, dos pasos, para producción de vapor saturado a 30 Psi.

1.3.2 Objetivos Específicos:

- 1.- Evaluar el estado de la caldera pirotubular horizontal de dos pasos Continental.
- 2.- Evaluar el sistema de tratamiento de agua de alimentación de la caldera.
- 3.- Evaluar la instrumentación y el sistema de control de la caldera.
- 4.- Presentar el diagnóstico producto de la evaluación de la caldera.
- 5.- Desarrollar un manual de procedimientos para la puesta en funcionamiento de la caldera.
- 6.- Arrancar y operar la caldera.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 TRANSFERENCIA DE CALOR

2.1.1 Definición

La transferencia de calor se define como el movimiento de la energía, en forma de calor, desde una fuente de mayor temperatura hacia cualquier sistema de menor temperatura. En una caldera generalmente ocurren tres tipos de transferencia de calor: radiación, convección y conducción.

2.1.2 Mecanismos de Transferencia de Calor

Conducción: es el proceso de transferencia de calor en el cual el intercambio de energía ocurre desde la región de mayor temperatura a la de menor temperatura, por el movimiento cinético y el impacto directo de las moléculas, como en el caso de los fluidos en reposo, o por el arrastre de los electrones, como es el caso de los metales.

La ley básica de la conducción del calor, Ley de Fourier, establece que la tasa de transferencia de calor por conducción en una dirección dada, es proporcional al área normal a la dirección del flujo de calor y al gradiente de temperatura en esa dirección (Welty, 1997).

Por ejemplo, para el flujo de calor en la dirección radial r , la Ley de Fourier está dada por:

$$Q_r = -k \cdot A \frac{dT}{dr} \quad (1)$$

Convección: es el mecanismo de transferencia de calor que ocurre entre la superficie de un sólido y un fluido adyacente en movimiento. Las moléculas frías abandonan la superficie del sólido y se reemplazan por moléculas calientes provenientes del medio de calentamiento (fluido), o viceversa. Debe tenerse en cuenta que las partículas de flujo próximas a la frontera sólida tienden a estar en reposo. Esta “película” de fluido representa, a menudo, la principal resistencia a la transferencia de calor convectivo. Como esto es siempre válido, el mecanismo de transferencia de calor entre una superficie sólida y un fluido, debe incluir la conducción a través de las capas de fluido cercanas a la superficie (Welty, 1997).

Se dice que la transferencia de calor es por convección forzada si el movimiento es inducido artificialmente, por ejemplo, con una bomba o un ventilador que impulse el fluido sobre la superficie. Se dice que la transferencia de calor es por convección libre o natural, si el movimiento del fluido es ocasionado por fuerzas de empuje debidas a diferencias de densidad causadas por un gradiente de temperatura en el fluido. En aplicaciones de la ingeniería, para simplificar los cálculos de transferencia de calor entre una superficie a temperatura T y un fluido que se desplaza sobre ella a temperatura media T_f , se define el coeficiente de transferencia de calor h como:

$$h = \frac{Q}{A \cdot (T_f - T)} \quad (2)$$

Esta relación se conoce con el nombre de Ley de enfriamiento de Newton (Necati, 1979).

Radiación: la energía radiante emitida por un cuerpo, debido a su temperatura, es transmitida en el espacio en forma de ondas electromagnéticas de acuerdo con la teoría clásica de las ondas electromagnéticas de Maxwell, o en forma de fotones discretos de acuerdo con las hipótesis de Planck. Ambos conceptos han sido utilizados en la investigación de la transferencia de calor por radiación. La emisión o absorción de energía radiante por un cuerpo es un proceso global, o sea, la radiación que se origina en el interior del cuerpo se emite a través de la superficie; recíprocamente, la radiación que incide sobre la superficie de un cuerpo penetra en el medio, en donde es atenuada. Se puede decir que la radiación es absorbida o emitida por la superficie cuando una gran proporción de la radiación incidente se atenúa en una distancia muy pequeña a partir de la superficie. (Necati, 1979)

La energía radiante emitida por un cuerpo es proporcional a la cuarta potencia de su temperatura absoluta. Si se considera, por ejemplo, que un cuerpo negro (esto es, un emisor perfecto y un receptor perfecto) de temperatura absoluta T_1 está dentro de un recinto de temperatura absoluta T_2 , el cuerpo emitirá energía radiante en cantidad:

$$Q = A\sigma T_1^4 \quad (3)$$

y absorberá energía radiante en cantidad:

$$Q = A\sigma T_2^4 \quad (4)$$

así que la energía radiante neta que sale del cuerpo será:

$$Q = A\sigma(T_1^4 - T_2^4) \quad (5)$$

Si los dos cuerpos no son perfectamente negros y si la superficie A no está completamente rodeada por el otro cuerpo, entonces la ecuación (5) se puede modificar de la siguiente manera:

$$Q = Ff \cdot A \cdot \sigma(T_1^4 - T_2^4) \quad (6)$$

donde el factor Ff es una cantidad menor que la unidad, que tiene en cuenta los efectos de la distribución geométrica de las superficies y el hecho de que los cuerpos no sean emisores o receptores perfectos (Necati, 1979).

2.1.3 Tipos de Flujo de Fluidos

Como el modo de transferencia de calor por convección está íntimamente ligado al movimiento del fluido, es necesario tener algún conocimiento acerca del mecanismo del flujo del fluido, antes de poder investigar el mecanismo del flujo de calor. Uno de los aspectos más importantes del análisis hidrodinámico es establecer cuando el movimiento de un fluido es laminar o turbulento.

En el flujo laminar, el fluido se mueve en capas y cada partícula de fluido sigue una trayectoria uniforme y continua. Las partículas de fluido en cada capa conservan una secuencia ordenada sin pasarse unas a otras. Cuando el fluido fluye con movimiento laminar sobre una superficie a una temperatura diferente a la del fluido, el calor se transfiere únicamente por conducción molecular tanto dentro del fluido como en la cara intermedia entre el fluido y la superficie, no existen mezclas turbulentas o remolinos que transporten, a través de las líneas de corrientes, la energía almacenada en las partículas de fluido.

En contraste al movimiento ordenado del flujo laminar, el movimiento o trayectoria de cualquier partícula del fluido turbulento es irregular. En este flujo el mecanismo de transferencia de calor está modificado y ayudado por innumerables

remolinos que acarrean masa de fluido a través de las líneas de corrientes, estas partículas actúan como transporte de energía y la transfieren al mezclarse con otras partículas, por lo tanto, un incremento en la rapidez de mezclado (o turbulencia) incrementa también la rapidez de la transferencia del flujo de calor por convección.

En la región completamente turbulenta las condiciones se caracterizan por un movimiento tridimensional aleatorio de porciones grandes de fluidos, y no es de sorprender que esta transición a la turbulencia este acompañada por aumentos significativos en los coeficientes de convección (Welty, 1997).

En el flujo laminar, el coeficiente de convección puede determinarse analíticamente si los cuerpos son de forma geométrica simple, pero cuando tienen forma geométrica compleja, o si el flujo se encuentra en régimen turbulento, se debe determinar por métodos experimentales.

2.1.4 Grupos Adimensionales

Los datos experimentales para el cálculo del coeficiente convectivo de transferencia de calor y los resultados del análisis dimensional se pueden organizar de manera conveniente y concisa en forma de correlaciones entre los grupos adimensionales de las variables pertinentes. Entre estos grupos adimensionales, los utilizados para el cálculo térmico debido a la convección serán:

Número de Reynolds: Este número se interpreta como la razón de las fuerzas de inercia entre las fuerzas viscosas en la capa límite hidrodinámica. Para un volumen de control diferencial en esta capa límite, las fuerzas de inercia se asocian con un aumento en la cantidad de movimiento del fluido que se desplaza a través del volumen de control.

La ecuación que describe el número de Reynolds es la siguiente:

$$\text{Re} = \frac{\rho \cdot u \cdot L}{\mu} \quad (7)$$

Se espera que las fuerzas de inercia dominen para valores grandes de Re y que las fuerzas viscosas dominen para Re bajos. El número de Reynolds determina la existencia del flujo laminar, transicional y turbulento. Para valores menores de 2100 el régimen de flujo en una tubería se considera laminar, entre 2100 y 4000 se considera transicional y para valores mayores el régimen se considera turbulento.

En cualquier flujo existen pequeñas perturbaciones que se pueden amplificar para producir condiciones turbulentas. Sin embargo, para Re pequeños, las fuerzas viscosas son suficientemente grandes con relación a las fuerzas de inercia para evitar esta amplificación, por ello se mantiene el flujo laminar. Pero, al aumentar Re, los efectos viscosos se hacen menos importantes de manera progresiva en relación con los efectos de inercia, y las pequeñas perturbaciones se amplifican hasta el punto de que ocurre la transición (Welty, 1997).

Número de Prandtl: La interpretación física del número de Prandtl se sigue de su definición como una razón de la difusividad de la cantidad de movimiento a la difusividad térmica. Este número adimensional es proporcional a la cantidad de calor transferido.

$$\text{Pr} = \frac{\mu \cdot C_p}{k} \quad (8)$$

Número de Nusselt: El número de Nusselt es la relación entre el gradiente de temperatura en la superficie (interfaz) y un gradiente de referencia. Puede

interpretarse como la combinación del coeficiente de transferencia de calor por convección h , la longitud característica L y la conductividad térmica del fluido k .

$$Nu = \frac{h \cdot L}{k} \quad (9)$$

En la práctica, el número de Nusselt es una medida conveniente del coeficiente de transferencia de calor por convección debido a que, una vez conocido su valor, el coeficiente de transferencia de calor se puede determinar de la ecuación 9, en la que se nota que para un valor dado del Nu el coeficiente de transferencia de calor es directamente proporcional a la conductividad térmica, pero inversamente proporcional a la longitud característica que describe el sistema. En la convección forzada, el número de Nusselt es función del número de Reynolds y Prandtl. (Welty, 1997).

Diferencia de Temperatura Media Logarítmica: Para cálculos típicos de transferencia de calor, se hace necesario el uso de la diferencia de temperatura media logarítmica. Ésta se define como el promedio logarítmico entre las diferencias de temperaturas en la entrada y en la salida de los fluidos que intercambian calor, según la siguiente ecuación.

$$LMTD = \frac{(T_{1in} - T_{2in}) - (T_{1out} - T_{2out})}{Ln\left(\frac{T_{1in} - T_{2in}}{T_{1out} - T_{2out}}\right)} \quad (10)$$

La ecuación (10) está definida para una configuración en cocorriente de los fluidos que intercambian calor. Para una configuración en contracorriente T_{2in} se intercambia con T_{2out} . (Welty, 1997).

2.2 CALDERAS

2.2.1 Definición

Las calderas o generadores de vapor son instalaciones industriales que, aplicando el calor de un combustible sólido, líquido o gaseoso, vaporizan o calientan un fluido para aplicaciones industriales.

Las calderas son diseñadas para transmitir el calor procedente de una fuente externa (generalmente combustión de algún combustible), a un fluido contenido dentro de la misma, generalmente agua para producir vapor de agua saturado y en algunos casos sobrecalentado como en la generación de electricidad en las centrales termoeléctricas.

Hasta principios del siglo XIX se usaron calderas para teñir ropas, producir vapor para limpieza, etc., hasta que Dionisio Papin creó una pequeña caldera llamada "marmita". Se usó vapor para intentar mover la primera máquina homónima, la cual no funcionaba durante mucho tiempo ya que utilizaba vapor húmedo (de baja temperatura) y al calentarse ésta dejaba de producir trabajo útil. Luego de otras experiencias, James Watt completó una máquina de vapor de funcionamiento continuo, que usó en su propia fábrica. La máquina elemental de vapor fue inventada por Dionisio Papin en 1769 y desarrollada posteriormente por James Watt en 1776. Inicialmente fueron empleadas como máquinas para accionar bombas de agua de cilindros verticales. Ella fue la impulsora de la revolución industrial, la cual comenzó en ese siglo y continúa en el actual. (Shield, 1982).

2.2.2 Usos

Se han desarrollado muchos y variados tipos de unidades generadoras de vapor. Sus características varían de acuerdo a la naturaleza del servicio que prestan. Las calderas reciben básicamente las denominaciones estacionarias (las instaladas en tierra) y móviles (para navíos y locomotoras).

Las calderas estacionarias se utilizan en la generación de vapor para procesos industriales, intercambiadores de calor, generación de electricidad (termoeléctricas), calefacción. etc. (Shield, 1982).

2.2.3 Clasificación de las calderas

Por la disposición de los fluidos:

Pirotubulares: En este tipo de calderas los gases de combustión circulan por el interior de los tubos y manejan presiones de operación de 0-300 psig. Este tipo de calderas son de menor costo inicial, menores exigencias de pureza en el agua de alimentación, menor tamaño y eficientes, en contraparte no son utilizables para altas presiones, necesitan de un mayor tiempo para aumentar presión y entrar en funcionamiento.

La caldera de vapor pirotubular, concebida especialmente para aprovechamiento de gases de recuperación presenta las siguientes características.

El cuerpo de la caldera, está formado por un cuerpo cilíndrico de disposición horizontal, incorpora interiormente un paquete multitubular de transmisión de calor y una cámara superior de formación y acumulación de vapor. La circulación de gases se realiza desde una cámara frontal dotada de brida de adaptación, hasta la zona

posterior donde termina su recorrido en otra cámara de salida de humos, como se puede ver en la figura N°1.

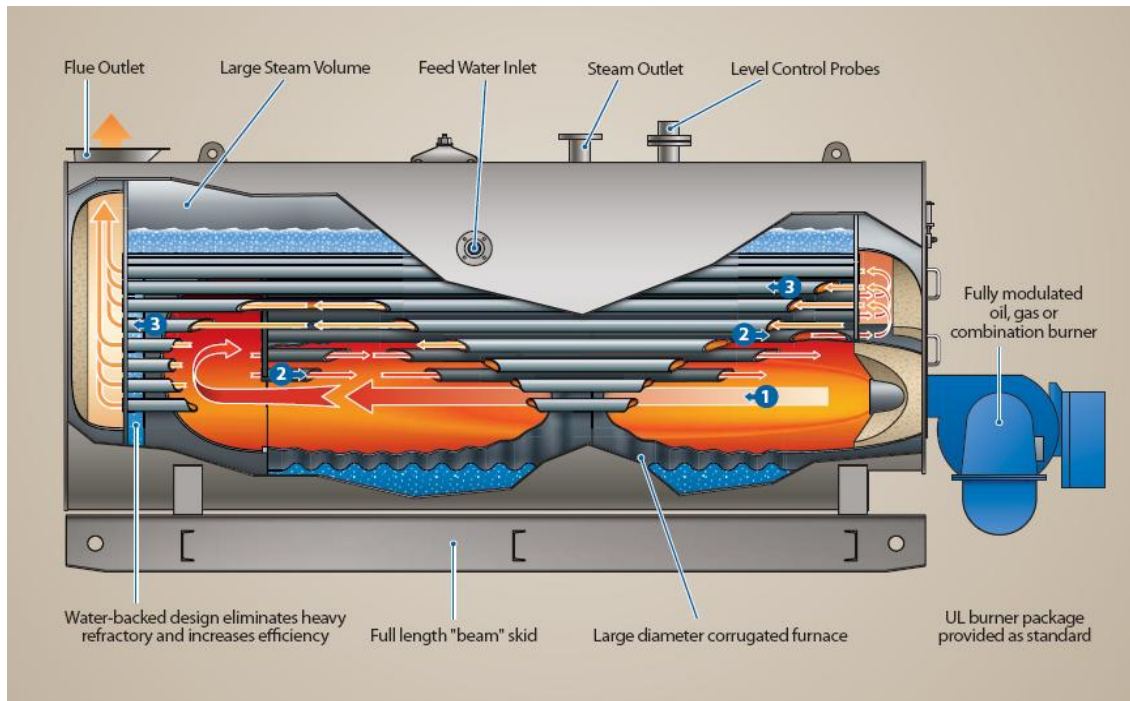


Figura N° 1 Caldera pirotubular . (Llorens, 1999).

El acceso al cuerpo del lado de los gases de combustión, se realiza mediante puertas atornilladas y abisagradas en la cámara frontal y posterior de entrada y salida de gases, equipadas con bridas de conexión. En cuanto al acceso al lado agua, se efectúa a través de la boca de hombre, situada en la bisectriz superior del cuerpo y boca de registros de mano para facilitar la limpieza de posible acumulación de lodos. (Severns y Degler , 1975).

Acuotubulares: En este tipo de calderas el agua circula por el interior de los tubos y manejan presiones de operación de 0-2200 psig. Pueden ser puestas en marcha rápidamente . Pero a diferencia de las pirotubulares son de mayor tamaño y peso, mayor costo y deben ser alimentadas con agua de gran pureza. (Shield, 1982).

Por su configuración:

- Horizontales
- Verticales

Por el numero de pasos: Las calderas en su configuración interna presentan tuberías para el transporte de los fluidos, las cuales pueden ser de 1, 2 ó 3 pasos que no es más que el número de veces que dicho fluidos atraviesan la caldera.

Por el combustible empleado:

- Combustibles sólidos (carbón, madera, bagazo, biomasa).
- Combustibles líquidos (gasolina, gasoil).
- Gas (gas natural, GLP)
- Nucleares
- Mixta

Existen muchos otros tipos de clasificación como: el tipo de quemador, usos, materiales de fabricación etc. pero estas clasificaciones serian un subconjunto de las calderas pirotubulares y acuotubulares.

2.2.4 Partes de una caldera

Cámara de agua: Recibe este nombre el espacio que ocupa el agua en el interior de la caldera. El nivel de agua se fija en su fabricación, de tal manera que sobrepase en unos 15 centímetros. por lo menos a los tubos o conductos de humo superiores. Con esto, a toda caldera le corresponde una cierta capacidad de agua, lo cual forma la cámara de agua.

Según la razón que existe entre la capacidad de la cámara de agua y la superficie de calefacción, se distinguen calderas de gran volumen, mediano y pequeño volumen de agua.

Cámara de vapor: Es el espacio ocupado por el vapor en el interior de la caldera, cuanto más variable sea el consumo de vapor, tanto mayor debe ser el volumen de esta cámara, de manera que aumente también la distancia entre el nivel del agua y la toma de vapor.

Hogar de combustión o Cámara de combustión: El hogar de combustión es una de las partes de mayor importancia en una caldera de vapor, en él se produce la reacción entre el combustible (en este caso, gas natural) y el comburente (el aire). Estas reacciones de combustión son muy exotérmicas, y provocan la aparición de una llama. La existencia de la llama, y las altas temperaturas alcanzadas resultantes de la combustión, tienen como consecuencia que la mayor parte del calor hacia los tubos donde se evapora el agua se transmita por radiación.

Caja de humos: Es la parte de la caldera donde confluyen los gases de combustión; desde este punto, mediante un tramo de conexión, son conducidos hasta la chimenea.

Puertas o tapas de caldera: Es el punto donde se coloca el quemador, deben estar construidas con materiales capaces de soportar las altas temperaturas que se producen en su proximidad. La mayoría posee una capa de refractario donde chocan

los humos de combustión, Son abatibles, para permitir la limpieza interior, necesaria para el mantenimiento de la caldera.

Chimenea: Es un conducto cilíndrico de acero, que sirve para trasladar los gases de combustión a la atmósfera. La función primordial de la chimenea es proveer suficiente tiro para mantener una presión negativa dentro de la cámara de combustión. La buena práctica recomienda la utilización de una chimenea por cada 40 pies de tubería conectiva. La mayoría de ellas son auto soportadas, fabricadas en planchas de 6 milímetros de espesor.

Envolvente Aislante: El conjunto de caldera debe estar recubierto por una chaqueta envolvente con material aislante térmico, con el fin de disminuir las pérdidas de calor de la misma. Es muy importante mantener en buen estado este envolvente, ya que su deterioro provoca grandes pérdidas de calor, debidas a las altas temperaturas que alcanzan los componentes de las calderas.

Registros de mano y hombre: Los registros de mano son aberturas ubicadas alrededor de la carcasa de la caldera en forma elíptica, los más comunes son de 3 X 4 pulgadas de diámetros, los cuales son cubiertos por piezas metálicas de mayor tamaño que se colocan por la parte interior, llevan empacaduras (goma o metalgrafito) y son ajustados con tornillos y tuercas por la parte exterior, estos orificios tienen como finalidad la inspección ocular en el interior de la caldera así como su mantenimiento. El registro hombre tienen la misma forma que los registros de mano la diferencia radica en el tamaño (son mucho más grandes), con la finalidad de hacer algún tipo de reparación dentro de la caldera, normalmente hay uno solo por caldera a diferencia de los registros de mano los cuales varían desde 4 hasta 6 por caldera.

2.2.5 Capacidad de producción de vapor de las calderas

La producción de un generador de vapor se da frecuentemente en libras de vapor por hora, pero como quiera que el vapor a distintas presiones y temperaturas posee diferentes cantidades de energía, ese sistema no mide exactamente la energía producida. La capacidad de una caldera de vapor se expresa más concretamente en forma de calor total transmitido por la superficie de calefacción en kilocalorías por hora. Debido a que este valor numéricamente es grande la ASME (American Society of Mechanical Engineers) recomienda como unidad de la kilo Btu (= 1000 Btu = 254 kcal). El proceso de transmisión de calor que tiene ocasión en un generador de vapor es un proceso de flujo constante, en el cual el calor transmitido es igual a la variación de la entalpia del fluido. Por lo consiguiente, la producción de la caldera medida por el calor absorbido por el agua y vapor será:

$$\text{en kcal por hora} \quad (11)$$

Cuando la masa del vapor m_s es la cantidad máxima que la caldera puede producir por hora a la temperatura de trabajo especificada la ecuación (11) da como resultado la capacidad máxima. Pero si m_s representa el peso de vapor que la caldera puede producir con más eficiencia la producción correspondiente se denomina capacidad normal.

La potencia en HP de una caldera o BoHP (boiler horse power), tal como fue establecida en 1889 por la ASME, estaba basada en una máquina de vapor que empleaba 13,62 kilogramos de vapor por HP hora a una presión relativa de 4.9 kg/cm² y con el agua de alimentación a 38,5 °C. Esto corresponde a la vaporización de 15,66 kg de agua por hora a 100 °C en vapor seco a 100 °C, a presión atmosférica normal (1,033 kg/cm²). En estas condiciones cada kilogramo de vapor producido

requiere la entalpia de vaporización a la presión atmosférica normal, la cual tiene un valor de 543,4 kcal (Severns y . Degler 1975). Por consiguiente la capacidad de una caldera podrá expresarse de la siguiente forma:

$$\text{HP de caldera} = \frac{\quad}{\quad} \quad (12)$$

Otras unidades de capacidad de calderas que se han utilizado para fines comparativos son el factor de vaporización. El factor de vaporización es la relación entre el vapor absorbido por 1 kg de agua de alimentación en las condiciones reinantes de la caldera y el absorbido por 1 kg de agua a 100°C al vaporizarla a 100°C (Severns y . Degler 1975). De donde resulta,

$$\text{Factor de vaporización} = \frac{\quad}{\quad} \quad (13)$$

Otro término utilizado es la potencia nominal. Todas las calderas pirotubulares están basadas en 0,93 m² de superficie de calefacción por HP de caldera. Según este procedimiento todas las calderas que tengan la misma superficie de calefacción tendrán la misma potencia nominal; ahora bien, una caldera puede tener su superficie de calefacción en forma más ventajosa que otra y, como consecuencia, mas capacidad en condiciones de trabajo similares. (Severns y . Degler 1975).

2.3 TRATAMIENTO DE AGUA PARA ALIMENTACION DE CALDERA

2.3.1 Fuentes de Agua

Las fuentes de agua corresponden a toda aquella agua (ríos, lagos, océanos, etc.), que no ha recibido ningún tipo de tratamiento y por lo tanto contiene impurezas, adquiridas durante el ciclo al que ha sido sometida, que impiden su utilización directa en una caldera.

A medida que el agua fluye por sobre la superficie de la tierra o se filtra a través de las capas de ésta, continua atrapando o disolviendo impurezas del suelo o minerales por los que atraviesa. Así es como agua aparentemente cristalina, proveniente de lagos, ríos y vertientes, puede tener un elevado contenido de sólidos disueltos. (Catalán, 1969)

2.3.2 Parámetros a evaluar en el Tratamiento de Agua

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

Dureza: Los suministros de agua natural contienen sales disueltas, las cuales se disocian en el agua para formar partículas con carga, conocidas como iones. Estos iones están presentes por lo general en concentraciones relativamente bajas, y permiten que el agua conduzca electricidad. Algunas veces se conocen como electrolitos. Estas impurezas iónicas pueden causar problemas en los sistemas de enfriamiento y calefacción, generación de vapor, y manufactura. Los iones comunes que se encuentran en la mayoría de las aguas incluyen los cationes de carga positiva; calcio y magnesio, cationes que generan dureza, los cuales hacen que el agua sea “dura”. Los aniones de carga negativa incluyen alcalinidad, sulfato, cloruro, y silicio.

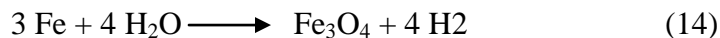
La dureza del agua cuantifica principalmente la cantidad de iones de calcio y magnesio presentes en el agua, los que favorecen la formación de depósitos e incrustaciones difíciles de remover sobre las superficies de transferencia de calor de una caldera.(Catalán, J. 1969).

Sólidos disueltos totales (SDT): Los sólidos disueltos la cantidad de sólidos (impurezas) disueltas en al agua. El total de sólidos disueltos en la caldera (SDT) es uno de los parámetros utilizados para controlar el programa de tratamiento de agua. Con el agua de alimentación, continuamente se están añadiendo sólidos disueltos al agua de la caldera; éstos no son evaporados junto con el vapor y, como resultado de esto, los sólidos totales en suspensión aumentan. (Catalán, J, (1969).

pH: El pH representa las características ácidas o alcalinas del agua, por lo que su control es esencial para prevenir problemas de corrosión (bajo pH) y depósitos (alto pH) (Shield, 1982).

Oxígeno: El oxígeno presente en el agua favorece la corrosión de los componentes metálicos de una caldera. La presión y temperatura aumentan la velocidad con que se produce la corrosión.(Shield, 1982).

Una forma de corrosión que suele presentarse con cierta frecuencia en calderas, corresponde a una reacción de este tipo:



Dióxido de carbono: El dióxido de carbono, al igual que el oxígeno, favorece la corrosión. Este tipo de corrosión se manifiesta en forma de ranuras. La corrosión

en las líneas de retorno de condensado generalmente es causada por el dióxido de carbono. El CO₂ se disuelve en agua (condensado), produciendo ácido carbónico. La corrosión causada por el ácido carbónico ocurrirá bajo el nivel del agua y puede ser identificada por las ranuras o canales que se forman en el metal(Shield, 1982).

Alcalinidad: Representa la cantidad de carbonatos, bicarbonatos, hidróxidos y silicatos o fosfatos en el agua. La alcalinidad del agua de alimentación es importante, ya que, representa una fuente potencial de depósitos (Shield, 1982).

Sólidos en suspensión: Los sólidos en suspensión representan la cantidad de sólidos (impurezas) presentes en suspensión (no disueltas) en el agua (Shield, 1982).

Los valores en los cuales estos parámetros deberían mantenerse para el agua de alimentación de la caldera se pueden ver en la tabla n° 1.

Tabla n°1: Requerimientos agua alimentación calderas vapor (hasta 150 psi)

PARAMETRO	VALOR REQUERIDO
DUREZA TOTAL	< 2 ppm
CONTENIDO DE OXIGENO	< 8 ppb
DIOXIDO DE CARBON	< 25 mg/l
CONTENIDO TOTAL DE HIERRO	< 0,05 mg/l
CONTENIDO TOTAL DE COBRE	< 0,01 mg/l
ALCALINIDAD TOTAL	< 25 ppm
Ph a 25 C°	8.5 – 9.5

(Shield, 1982).

Los valores permisibles en los cuales se deben mantener estos parámetros en el agua dentro de la caldera se pueden ver en la tabla n° 2.

Tabla n°2: Requerimientos agua dentro de la caldera (hasta 150 psi)

PARAMETRO	VALOR RECOMENDADO
Ph a 25 C°	10.5 - 11,8
Alcalinidad Total CaCO3	< 700 ppm
Alcalinidad Cáustica	> 350 ppm
Secuestrantes de Oxígeno:	
Sulfito de Sodio	30 – 70 ppm
Hidrazina	0.1 – 10 ppm
Taninos	120 – 180 ppm
Fosfato Na3PO4	30 - 60 mg/l
Hierro	< 3.0 ppm
Sílice	150 ppm
Sólidos disueltos	< 3500 ppm
Sólidos en suspensión	< 200 ppm
Conductividad	< 7000 uS/cm

(Shield, 1982).

2.3.3 Problemas más Frecuentes

A continuación se describen los problemas, asociados al tratamiento de agua, encontrados con mayor frecuencia en las calderas

Corrosión: Las principales fuentes de corrosión en calderas son la Corrosión por Oxígeno o “Pitting” y la Corrosión Cáustica.

A continuación se describe en que consiste cada uno de estos tipos de corrosión, cuáles son los factores que los favorecen, que aspecto tiene y de que manera pueden ser prevenidas (Shield, 1982).

Corrosión por Oxígeno o "Pitting": La corrosión por oxígeno consiste en la reacción del oxígeno disuelto en el agua con los componentes metálicos de la caldera (en contacto con el agua), provocando su disolución o conversión en óxidos insolubles. Los resultados de este tipo de corrosión son tubérculos de color negro, los que se forman sobre la zona de corrosión, tal como lo muestra la figura N° 2.



Figura N° 2. Corrosión por oxígeno o "pitting" (Shield, 1982).

Dado que la corrosión por oxígeno se produce por la acción del oxígeno disuelto en el agua, esta puede producirse también cuando la caldera se encuentra fuera de servicio e ingresa aire (oxígeno).

La prevención de la corrosión por oxígeno se consigue mediante una adecuada desgasificación del agua de alimentación y la presencia de un exceso de secuestrantes de oxígeno en el agua de la caldera.

Corrosión Cáustica: La corrosión cáustica se produce por una sobreconcentración local en zonas de elevadas cargas térmicas (fogón, cámara trasera, etc.) de sales alcalinas como la soda cáustica. Este tipo de corrosión se manifiesta en forma de cavidades profundas, semejantes al “pitting” por oxígeno, rellenas de óxidos de color negro, presentes solamente en las zonas de elevada liberación térmica de una caldera (Shield, C. 1982). La corrosión cáustica puede ser prevenida manteniendo la alcalinidad, OH libre y pH del agua de la caldera dentro de los límites recomendados en la tabla 1.

Incrustaciones: Las incrustaciones corresponden a depósitos de carbonatos y silicatos de calcio y magnesio, formados debido una excesiva concentración de estos componentes en el agua de alimentación y/o regímenes de purga insuficientes.

En el caso de que estas incrustaciones no sean removidas, se corre el riesgo de embancar la caldera y obstruir las líneas de purga de fondo, con lo que el problema puede tornarse aun más grave. La presencia de incrustaciones en una caldera es especialmente grave debido a que su baja conductividad térmica actúa como aislante térmico. (Shield, C,1982).Como se puede apreciar en la figura N°3.

La formación de incrustaciones en una caldera puede ser prevenida, satisfaciendo los requerimientos del agua de alimentación y agua de la caldera incluidos en la tabla N° 1 y N° 2, tratando el agua de alimentación y manteniendo adecuados regímenes de purga.

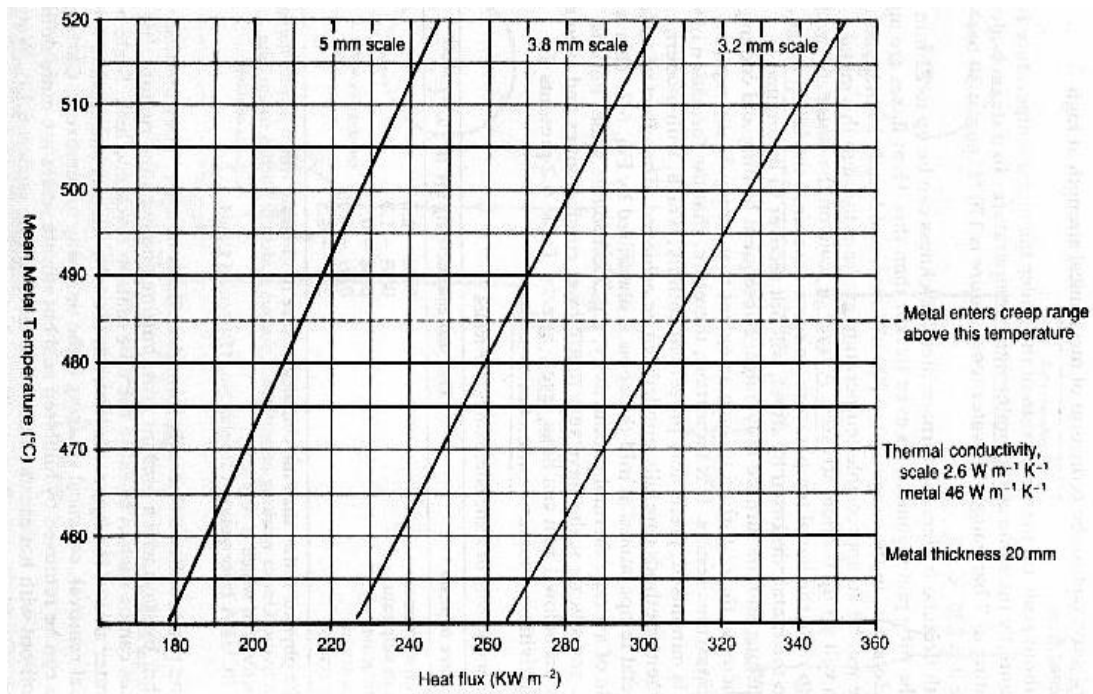


Figura N° 3. Efecto de incrustaciones y flujo de calor en la temperatura del metal. Shield, C. (1982).

En la tabla N° 3 se puede observar que la disminución de la transmisión de calor es directamente proporcional al aumento del espesor de la incrustación, provocando problemas de refrigeración de las superficies metálicas y puede llegar a causar daños por sobrecalentamiento.

TablaN° 3. Porcentaje de disminución de calor en función del espesor de las incrustaciones

Incrustación. (mm)	Disminución %
0	-
1	5,59
2	11,21
3	16,86
4	22,54
5	28,23
6	33,95
7	39,69
8	45,44
9	51,20
10	56,97

Severns (1975).

2.4 Equipos de Tratamiento de Agua

2.4.1 Suavizador

El principio de funcionamiento de estos equipos se basa en un proceso llamado “intercambio iónico”, que consiste en la sustitución de iones contenidos en una resina por iones contenidos en el agua.

El intercambio iónico es el proceso reversible de intercambio de iones entre una solución y un sólido insoluble en contacto con ella. Este cuerpo sólido, llamado intercambiador iónico, tiene que poseer ciertas características. En primer lugar, debe ser un compuesto iónico y segundo debe poseer una estructura molecular suficientemente porosa o abierta para permitir que los iones entren o salgan de ella por difusión. (Catalán, 1969).

Los intercambiadores de iones están constituidos por una estructura básica o matriz y por grupos activos (iones fijos). La estructura básica se compone principalmente de poliestireno reticulado con divinilbenceno presentando por tanto una estructura tridimensional de elevado peso molecular. (Catalán, 1969).

2.4.1.1 Resinas de Intercambio Iónico

Son pequeñas sustancias granuladas insolubles las cuales tienen en su estructura molecular radicales ácidos o básicos que pueden ser intercambiados. Los iones positivos o negativos fijados en estos radicales serán reemplazados por iones del mismo signo en solución en el líquido en contacto con ellos. Hoy en día, las sustancias de intercambio de iones son usadas casi exclusivamente con el nombre de resinas. (Catalán, 1969).

Las resinas sintéticas de intercambio iónico consisten en una matriz polimérica reticulada por la acción de un agente entrecruzante y con grupos inorgánicos que actúan como grupos funcionales. Son los materiales más habituales en las aplicaciones de intercambio iónico en la industria. (Catalán, 1969).

El entrecruzamiento confiere a la resina estabilidad y resistencia mecánica, así como insolubilidad. El grado de entrecruzamiento es un factor importante para controlar ya que no sólo determina las propiedades mecánicas de la resina, sino también su capacidad de hincharse (swelling) y de absorber agua.

El hinchado del polímero se produce cuando el disolvente penetra en los poros de la estructura polimérica, ensanchándolos y abriendo, por tanto, la estructura. A simple vista, se observa un aumento en el volumen que ocupa la resina, como se muestra en la figura N°4. El proceso de swelling favorece la permeabilidad de iones

en la matriz de la resina y mejora la accesibilidad a los grupos funcionales. Como inconveniente, el aumento de tamaño de la resina puede dar problemas de exceso de presión si la resina está empaquetada en una columna y también, que la resina sufra procesos de hinchado y deshinchado puede, con el tiempo, afectar a la estabilidad mecánica del polímero (Catalán, 1969).



Figura N° 4: Detalle de las esferas de resina de intercambio iónico. “Water Hardness”

2.4.1.2 Estructura física y química de las resinas

Los requisitos básicos de los materiales de las esferas de intercambio iónico son la insolubilidad, el tamaño de la esfera, y su resistencia a las fracturas. La resina deberá ser insoluble bajo condiciones normales de funcionamiento. Las esferas deberán tener dimensiones uniformes con un tamaño normal que varía entre 16 y 50 “US Mesh” (tamaño estadounidense de malla). El hinchamiento y contracción de la esfera de resina durante el agotamiento y la regeneración no deberán causar que revienten las esferas. Asimismo, una propiedad importante de las resinas de intercambio iónico es que el sitio activo se encuentra permanentemente ligado a la esfera. Las resinas de intercambio iónico pueden ser fabricadas en una de dos estructuras físicas, gelatinosa o macroporosa (Catalán, 1969).

2.4.1.3 Reacción de intercambio iónico

Los intercambiadores iónicos son matrices sólidas que contienen sitios activos (también llamados grupos ionogénicos) con carga electrostática, positiva o negativa, neutralizada por un ion de carga opuesta (contraión). En estos sitios activos tiene lugar la reacción de intercambio iónico (Catalán, 1969).

Esta reacción se puede ilustrar con la siguiente ecuación tomando como ejemplo el intercambio entre el ion sodio, Na^+ , que se encuentra en los sitios activos de la matriz R, y el ion calcio, Ca^{2+} , presente en la disolución que contacta dicha matriz.



Cuando el cambiador iónico posee en su estructura cargas negativas, será capaz de retener e intercambiar iones cargados positivamente. Se habla en este caso de intercambiadores catiónicos, siendo la reacción que tiene lugar con la disolución una reacción de intercambio catiónico, como la descrita a continuación.



Donde R^- representa al intercambiador catiónico, A^+ al contraión del cambiador y B^+_s al catión de la disolución que pasa al cambiador (por simplicidad se ha representado el catión como monovalente, pero puede tener cualquier carga).

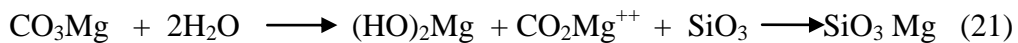
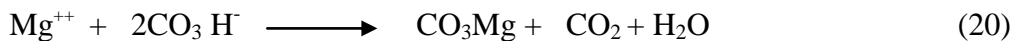
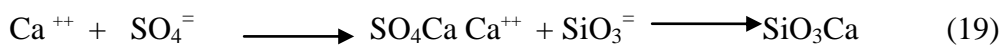
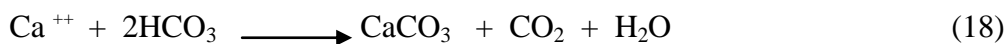
Cuando el cambiador iónico posee en su estructura cargas positivas, será capaz de retener e intercambiar iones cargados negativamente. Se habla en este caso de intercambiadores aniónicos, siendo la reacción que tiene lugar con la disolución una reacción de intercambio aniónico, lo cual se puede observar a continuación.



Donde R^+ representa al intercambiador aniónico, A^- al contraión del cambiador y B^-_s al anión de la disolución que pasa al cambiador.

Como resultado de estas reacciones un ion de la disolución (B^- ó B^+) sustituye al contraión (A^- ó A^+) fijado sobre el cambiador. En estas condiciones la estructura física del cambiador se mantiene, aunque se pueden producir cambios de dilatación.

Las reacciones químicas principales que se producen dentro de la caldera debido a la dureza del agua son las siguientes:



De las ecuaciones arriba escritas se puede ver que el tipo de resina que se va a utilizar para el agua de alimentación de una caldera es de carácter catiónico (Catalán, 1969).

2.4.1.4 Etapas del proceso de intercambio iónico en el suavizador

Empaquetamiento de la columna: Consiste en introducir el intercambiador en el interior de la columna (suavizador), evitando la formación de bolsas de aire entre sus partículas para así obtener un lecho uniforme, es decir un lecho fijo. Esta operación se realiza habitualmente lavando el intercambiador con agua destilada, que además

resulta útil para eliminar posibles impurezas y para provocar el fenómeno de swelling. El swelling puede causar graves problemas si tiene lugar una vez el intercambiador se encuentra confinado en la columna y no se ha dejado espacio suficiente para alojarlo una vez ha incrementado su volumen. (Catalán, 1969).

Acondicionamiento del intercambiador: Muchas resinas comerciales se venden en una forma iónica que puede no ser la adecuada para el tratamiento que se desea realizar. Por ejemplo, una resina básica fuerte que tenga como contraión un grupo OH⁻ y que, por necesidades del proceso, sea deseable tener un ion Cl⁻ (Catalán, 1969).

En la etapa de acondicionamiento se procede a cambiar el contraión de la resina colocándola en contacto con una disolución concentrada del ion que se desea tener. Una vez se ha conseguido este objetivo y la resina está en la forma iónica deseada, debe eliminarse el exceso de esta disolución lavando la resina con agua destilada (Catalán, 1969).

Etapas de carga: En esta etapa tiene lugar el intercambio de iones entre la disolución a tratar y el intercambiador. La disolución a tratar se introduce en la columna y fluye gradualmente a través del intercambiador. Las condiciones de operación (velocidad de flujo, pH de la disolución etc.) dependerán del tipo de intercambiador utilizado, y es importante optimizarlas para obtener un buen rendimiento en cuanto a capacidad y selectividad.

Cuando el intercambiador comienza a estar saturado con los iones de la disolución que entra, se observa un aumento de la concentración de dichos iones en la disolución que sale de la columna. Esta descarga de iones se conoce como breakthrough, e indica que el tratamiento de la disolución por el intercambiador ya no está siendo efectivo. Una vez la concentración de estos iones en la disolución de salida iguala a la de la concentración de entrada, el intercambiador ha agotado toda su capacidad de intercambio en las condiciones de operación (Catalán, 1969).

Etapa de regeneración: La etapa de regeneración consiste en devolver el intercambiador saturado a su forma iónica inicial, empleando una disolución concentrada en el ion originariamente asociado al intercambiador (por ejemplo, un ácido mineral para una resina ácida fuerte). Esta etapa es importante en el proceso de intercambio iónico ya que el buen funcionamiento del intercambiador en sucesivos procesos de carga depende de una regeneración eficiente.

Para obtener el máximo rendimiento de esta etapa es importante optimizar parámetros como la concentración y volumen de disolución regenerante así como la velocidad de flujo. (Catalán, 1969).

La regeneración tiene dos inconvenientes importantes:

- *El gasto económico en regenerante:* Puede reducirse reutilizándolo hasta que pierda su eficiencia aunque esta opción tampoco es del todo económica ya que implica establecer unas condiciones para su almacenaje.
- *La generación de residuos:* Ya que después de regenerar el intercambiador se obtienen disoluciones altamente ácidas o básicas generalmente muy concentradas en metales que deben ser tratadas o eliminadas.

Para la regeneración de la resina catiónica utilizada en el agua de alimentación de una caldera la regeneración es realizada con sal sódica (NaCl) de calidad técnica con una concentración de 150 a 250 gr/l de resina. (Catalán, 1969).

2.4.2 Desgasificador

La función de un desgasificador en el tratamiento de agua para la alimentación de una caldera es eliminar el oxígeno y dióxido de carbono disueltos en el agua de alimentación de las calderas para prevenir problemas de corrosión o “pitting”.

El principio de funcionamiento de los desgasificadores se basa en el hecho que la solubilidad de los gases disueltos en el agua (O_2 y CO_2) disminuye cuando el agua está en el punto de ebullición ($100\text{ }^\circ\text{C}$ a presión atmosférica), tal como lo muestra la figura N° 5.

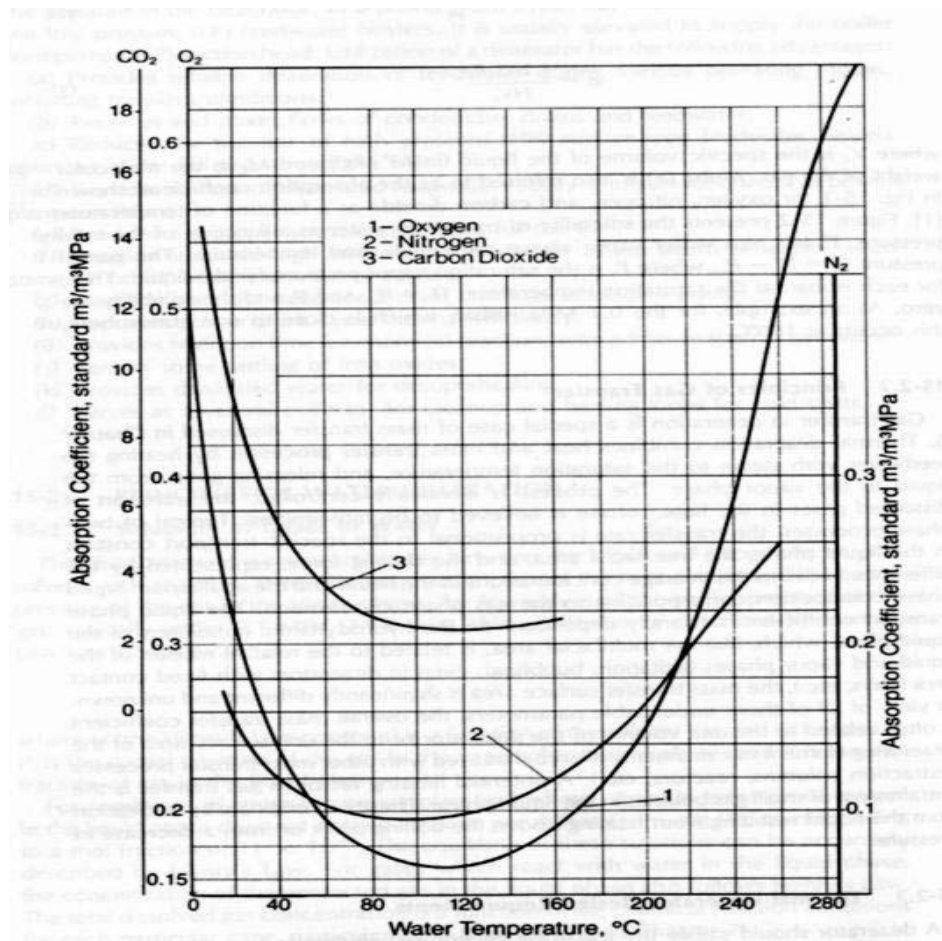


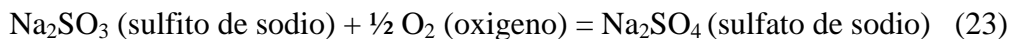
Figura N° 5. Solubilidad del oxígeno en función de la temperatura del agua. (Catalán, 1969).

La torre de los desgasificadores está compuesta por bandejas y/o boquillas en las que se aumenta la superficie del agua alimentada, formando cascadas o atomizándola para favorecer la liberación de los gases disueltos.

El agua que desciende por la torre es calentada hasta la temperatura de ebullición por vapor alimentado en contraflujo. La cantidad de vapor alimentada a la base del desgasificador es controlada por una válvula reductora de presión, encargada de mantener la presión de ebullición del agua. También existe una válvula termostática que controla la cantidad de vapor alimentada al estanque de almacenamiento para mantener el agua a la temperatura de ebullición. Los gases descargados por el agua son eliminados a través del venteo existente en la parte superior de la torre. (Llorens, 1999).

2.4.3 Remoción del oxígeno por método químico

Los desaeradores mecánicos pueden reducir el contenido de oxígeno en el agua de alimentación hasta fracciones de ppm. Sin embargo, para una eliminación completa se requiere un tratamiento químico adicional. Uno de los métodos más comunes es el que utiliza sulfito de sodio como catalizador, que reacciona con el oxígeno, produciendo sulfato de sodio, el cual no provoca corrosión.



La reacción química requiere 7.88 kg de sulfito de sodio puro por cada kilogramo de oxígeno. En la práctica se añaden, aproximadamente, 10 kg de sulfito de sodio por kilogramo de oxígeno para mantener un pequeño exceso de sulfito en el agua de la caldera. Este exceso dependerá de la presión de trabajo de la caldera, como se muestra en la Tabla 4. El sulfito de sodio se debe administrar continuamente a la caldera. Si se utilizan niveles más altos de sulfito, esto se convierte en un desperdicio;

además, el sulfito se puede descomponer y causar que el vapor y su condensado se vuelvan corrosivos (Catalán, 1969).

Tabla 4. Nivel en exceso de sulfito (SO₃) en el agua de la caldera

Presión (kg/cm²)	Sulfito residual (ppm de SO₃)
0 – 1	30-60
1 – 10	30-60
10 – 14	30-60
14 – 31	20-40
31 – 42	20-40
42 – 52	15 -30
52 – mas	15 -30

“Water Hardness”

2.5 INSTRUMENTACION Y CONTROL EN UNA CALDERA

Controlar de forma eficaz las condiciones de operación de una caldera es una necesidad obvia si se tiene en cuenta que las condiciones de trabajo (presiones y temperaturas elevadas) constituyen la causa principal de peligros por riesgo de explosiones. También debe tenerse en cuenta el aspecto económico, considerando no sólo los costes de construcción, sino también los elevados costes de operación (grandes cantidades de combustibles quemados) y de mantenimiento relacionados con las condiciones de operación ya mencionadas.

La búsqueda de condiciones óptimas de operación y el control de las mismas no es una tarea sencilla, ya que una caldera de vapor es un sistema muy complejo en el que todas las variables están interrelacionadas. Además, la realización de pruebas de forma directa sobre una caldera es inviable, tanto desde el punto de vista técnico,

(por los peligros derivados de la manipulación de las condiciones de operación), como económico, tiempo y dinero necesario. (Severns. 1975)

El sistema de control incluye:

- Control de la presión en la caldera, mediante la manipulación del flujo de entrada de combustible y flujo de aire al hogar.
- Control del nivel de líquido dentro de la caldera de vapor, mediante la manipulación del flujo de agua de alimentación a la caldera.
- Control de llama en el quemador

2.5.1 Clasificación de variables

- **Variables de entrada:** Denotan el efecto de los alrededores sobre el proceso químico.
- **Variables manipuladas:** Pueden ser ajustadas libremente por el operador o por un mecanismo de control.
- **Variables de perturbación:** Afectan al proceso y no son el resultado de ajustes de ningún operador o sistema de control.
- **Variables de salida:** Las cuales denotan el efecto del proceso sobre los controladores, son las variables que se desean tener bajo control.

2.5.2 Control regulador y servocontrol

En algunos procesos la variable controlada se desvía del punto de control a causa de las perturbaciones. El término control regulador se utiliza para referirse a los sistemas diseñados para compensar las perturbaciones. A veces la perturbación más importante es el punto de control mismo, esto es, el punto de control puede cambiar

en función del tiempo (lo cual es típico de los procesos por lote), y en consecuencia, la variable controlada debe ajustarse al punto de control; el termino servocontrol se refiere a los sistemas de control que han sido diseñados con tal propósito.

En la industria de procesos, el control regulador es bastante más común que el servocontrol, sin embargo, el método básico para el diseño de cualquiera de los dos es esencialmente el mismo. (Corripio 2006).

2.5.3 Estrategias de control

Control por retroalimentación: Es una técnica simple. Cualquier perturbación puede afectar a la variable controlada, cuando ésta se desvía del punto de control, el controlador cambia su salida para que la variable controlada regrese al punto de control. El circuito de control no detecta que tipo de perturbación entra al proceso, únicamente trata de mantener la variable controlada en el punto de control y de esta manera compensar cualquier perturbación.

La desventaja del control por retroalimentación radica en que este espera que se vea afectada la variable controlada para ejercer una acción de compensación con lo que la perturbación se habrá propagado por todo el proceso. Por lo que se puede decir que es una técnica de ensayo y error. (Corripio, 2006).

Control por acción Precalculada: El objetivo del control por acción precalculada es medir las perturbaciones y compensarlas antes de que la variable controlada se desvíe del punto de control; si se aplica de forma correcta la variable controlada no se desviará del punto de control.

Existen varias estrategias de control que trabajan de esta forma, estas son:

- Control de razón
- Control en cascada
- Sobre posición
- Control selectivo

2.5.4 Componentes básicos del sistema de control

Sensores y Transmisores

La función principal de los sensores y transmisores es la de realizar las operaciones de medición en el sistema de control. En el sensor se produce un fenómeno mecánico, eléctrico o similar, el cual se relaciona con la variable del proceso que se mide; el transmisor a su vez, convierte ese fenómeno en una señal que se puede transmitir y, por lo tanto, ésta tiene relación con la variable del proceso.

Existen tres términos importantes que se relacionan con la combinación sensor/transmisor: la escala, el rango y el cero del instrumento. A la escala del instrumento la definen los valores superior e inferior de la variable a medir en el proceso.

El rango del instrumento es la diferencia entre el valor superior e inferior de la escala. El valor inferior de la escala se conoce como *cero* del instrumento, este valor no necesariamente debe ser cero para llamarlo así. (Corripio 2006).

Sensores de presión: El sensor de presión más común es el *tubo de Bourdon*, desarrollado por el ingeniero francés Eugene Bourdon, consiste básicamente en un tubo en forma de herradura, con un extremo sellado y el otro conectado a la fuente de presión. Debido a que la sección transversal del tubo es elíptica o plana, al aplicarle una presión el tubo tiende a enderezarse, y al quitar la presión sobre el tubo, retorna a

su forma original, La cantidad de enderezamiento que sufre el tubo es proporcional a la presión que se aplica, y como el extremo abierto del tubo está fijo, entonces el extremo cerrado se puede conectar a un indicador, para señalar la presión; o a un transmisor, para generar una señal neumática o eléctrica.(Corripio 2006).

Sensor de nivel: Con el sensor de flotador se detecta el cambio en la fuerza de empuje sobre un cuerpo sumergido en líquido. Este sensor se instala generalmente en un ensamble que se monta de manera externa en el recipiente. La fuerza que se requiere para mantener el flotador en su lugar es proporcional al nivel del líquido y se convierte en una señal en el transmisor, este tipo de sensores son mas económicos que otros sensores de nivel. (Corripio 2006).

2.5.5 Válvulas de control

Las válvulas de control son los elementos finales de control más usuales y se les encuentra en las plantas de procesos, donde manejan los flujos para mantener en los puntos de control las variables que se deben controlar.

Las válvulas de control actúan como una resistencia variable en la línea del proceso; mediante el cambio de su apertura se modifica la resistencia al flujo y en consecuencia, el flujo mismo. Las válvulas de control no son más que reguladores de flujo. (Corripio 2006).

2.5.6 Controlador

El controlador es el encargado de tomar una decisión para mantener la variable controlada dentro del punto de control basado en la información recibida por el sensor/transmisor. Para hacerlo el controlador:

- Compara la señal del proceso que llega del transmisor, la variable que se controla contra el punto de control.
- Envía la señal apropiada a la válvula de control, para mantener la variable que se controla en el punto de control.

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA GENERAL

Para alcanzar los objetivos de este trabajo especial de grado se siguió la siguiente metodología.

3.1- Evaluación técnica de la caldera pirotubular horizontal de dos pasos Continental.

Se realizó la inspección ocular de la caldera, para esto se abrieron las tapas delantera y trasera de la misma, así como los registros de mano y hombre. Se verificó si la fuga de agua es debido a fisuras en los tubos de humo o en las empacaduras de los registros de mano, mediante una prueba hidrostática, la cual permitió descartar fugas en los tubos de humo así como en la cámara de agua.

3.2.- Evaluar el sistema de tratamiento de agua de alimentación de la caldera.

Se realizó un estudio a la salida del suavizador para verificar la cantidad total de sólidos disueltos (TSD), así como la dureza contenida en la misma, se extrajo una porción de resina del intercambiador catiónico y se verificó su estado físico químico.

3.3.- Evaluación de la instrumentación y del sistema de control de la caldera.

Se revisó cada uno de los lazos de control de la caldera y se realizaron las siguientes pruebas:

Detección de llama: Para esta prueba se desconectó la foto celda encargada de captar la luz emitida por la llama en el interior de la caldera una vez encendida.

Disparo por alta y baja presión de combustible: Se cerró la válvula principal de combustible verificando que el switch de baja presión se activo, para el de alta presión se ajustó el setpoint de forma que quedo por debajo del valor de la presión del combustible en condiciones de trabajo normal en la caldera.

Nivel de agua: Se abrió la válvula de purga de control de nivel simulando así una disminución en el nivel de agua dentro de la caldera, verificando el punto en que se enciende la bomba de alimentación, y luego se verificó que el controlador anunciara una falla, apagando la caldera.

Disparo por falla de flujo de aire: Se desconectó el sensor de presión del ventilador del quemador, y luego se verificó que el controlador anunciara una falla.

Disparo de válvula de seguridad: Se desconectó tanto el presostato de operación como el de seguridad para simular una avería en ellos, con la caldera encendida se dejó llegar hasta la presión de activación de la válvula de seguridad.

Barrido del horno (pre purga de encendido).

Todas estas pruebas son requeridas por INPSASEL (Instituto Nacional de Prevención, Salud y Seguridad Laboral), para el funcionamiento efectivo y seguro de una caldera.

3.4.- Informe diagnóstico producto de la evaluación de la caldera.

Dicho informe se entregó en el mismo formato exigido por el INPSASEL el cual contiene información de todas las pruebas realizadas a la caldera, así como observaciones adicionales de la sala de generación de vapor y otras recomendaciones. La entrega de este informe certifica que la caldera está en óptimas condiciones para su funcionamiento, ya que éste se realizó una vez tomadas las acciones necesarias para corregir fallas o desperfecto en la caldera.

3.5.- Manual de procedimientos para la puesta en funcionamiento de la caldera.

Manual basado en las instrucciones necesarias a seguir para el encendido y funcionamiento seguro de la caldera. Dicho manual cuenta también con información necesaria para que el técnico del laboratorio pueda realizar mantenimiento preventivo básico así como el control de purgas de fondo de la caldera.

3.6.- Arranque y operación de la caldera.

Una vez que se completaron los objetivos anteriores, se procedió al encendido de la caldera, monitoreando su funcionamiento por un lapso de una (1) semana aproximadamente, encendiéndola diariamente, dejando que realizara ciclos completos de presurización. Se realizó un análisis a los humos de combustión para asegurarse que la mezcla aire-combustible es la más eficiente, dejándola en óptimo funcionamiento para las venideras prácticas de laboratorio en las cuales se requiera vapor saturado.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección se exponen todos los análisis y discusión de los resultados en la evaluación y puesta en funcionamiento de la caldera, demostrando así el logro de los objetivos planteados en este Trabajo Especial de Grado.

4.1.- Evaluación de la caldera.

Se procedió a hacer una inspección visual alrededor de la caldera notándose que la misma presentaba daños en su estructura exterior (ver Apéndice B). Para inspeccionarla en su parte interna se destaparon las puertas delantera y trasera, donde se pudo observar que existía una fuga de agua, también se notó en el interior (cámara de agua) que no presentó muestras de incrustaciones pero se pudo ver que los tubos tenían alto grado de corrosión (pitting).



Figura N° 6. Efecto de la Corrosión en tubos. (Tomada de la caldera de LOU).

Esta corrosión es resultado de la no aplicación de un tratamiento mecánico o químico, empleados para la remoción de oxígeno en el agua de alimentación.

En ausencia de un desgasificador o una línea de retorno de condensado, el agua de alimentación de la caldera entra sin ser previamente precalentada, al estar a temperatura ambiente no se promueve la disminución en la solubilidad del oxígeno contenido en el agua (ver figura N°5), con lo que dificulta el desprendimiento de las moléculas de oxígeno en el tanque de alimentación, acelerando el proceso de corrosión dentro de la caldera.

Al no aplicarle un tratamiento químico, el tanque de alimentación de la caldera carece de un secuestrante de oxígeno, como el sulfito de sodio, el cual reaccionará ante la presencia de las moléculas de oxígeno contenidas en el agua, formando sulfato de sodio, el cual no es corrosivo (ecuación 23) y puede ser removido mediante purgas de fondo.

Después de la evaluación preliminar se realizó la prueba hidrostática, la cual tenía como objetivo fundamental verificar que no existiese ningún tipo de fuga dentro de la caldera, ya sea por los tubos de humo, válvulas, conexiones o registros de mano. Dicha prueba consta en taponear todas las entradas y salidas de agua y vapor, así como la remoción de todos los sensores transmisores conectados directamente al cuerpo de la caldera, para evitar cualquier daño que pudiese causarle la sobre presión a la cual fue sometida. Una vez realizado esto se conectó la bomba tipo pistón manual (ver anexo B) y se aumentó la presión hasta 225 psi que representa un aumento de 1,5 veces la presión máxima de trabajo (150 psi). Una vez aumentada la presión hasta ese valor se observó una caída de presión, lo que indica que la caldera tenía una fuga, percatándonos que existían tres (3) tubos de humo fisurados como se puede ver en la figura N° 7, además de encontrarse agrietado un registro de mano (ver Apendice B). Todos estos daños a las partes metálicas fueron ocasionados por el problema de corrosión descrito anteriormente.



Figura N° 7. Tubos fisurados de la caldera

En la figura N° 7, también se puede observar que los tubos afectados fueron los que están ubicados por debajo de la marca de agua dejada por la inundación, que al no ser corregida a tiempo afectó la parte interna de los tubos de humo, debilitándolos al punto de fisura.

4.2.- Evaluación de sistema de tratamiento de agua.

El sistema de tratamiento de agua a la caldera tiene como equipos principales una batería de intercambiadores iónicos compuesta por un intercambiador catiónico conectado en serie a un intercambiador iónico. El problema de este sistema de tratamiento no es sólo el estado general de los equipos mencionados, al cual le hacen falta partes como: las tapas bridadas en la parte superior o el estado del lecho de

relleno, resina catiónica para el caso del intercambiador catiónico y resina aniónico para el intercambiador aniónico. El problema fundamental de este sistema de tratamiento de agua es la falta de un filtro antes de la batería de los intercambiadores iónicos, para evitar que el agua no filtrada, la cual contiene impurezas sólidas, se pongan en contacto directo con la resina, causándole así un daño, por lo que no tiene ningún sentido realizar cualquier tipo de análisis al agua, ya que estos intercambiadores iónicos no podrán ser conectados a la red de generación de vapor hasta tanto no sea instalado, anterior a ellos, un filtro.

La generación de vapor sin la utilización de dichos intercambiadores para este caso, no representa un peligro mayor para la caldera, debido a la poca demanda de vapor y el tiempo de funcionamiento de la caldera, así como la presión de trabajo 30 psi, la cual es relativamente baja para este tipo de equipos, esto se puede observar en la figura N° 6, donde no hay ninguna muestra de incrustaciones solo se observa corrosión por falta del tratamiento de remoción de oxígeno.

Según Shield (1982), la presencia de incrustaciones en una caldera es especialmente grave, debido a su baja conductividad térmica, ya que actúa como aislante, sin embargo en este caso, convendría propiciar la formación de una película de incrustación de Carbonato de Calcio (CaCO_3) en la tubería interna, con el objeto de protegerla del problema de la corrosión. En relación a la baja conductividad térmica, esta no afecta en gran medida en la eficiencia de la caldera, debido a la baja demanda de vapor del Laboratorio de Operaciones Unitarias.

4.3 Evaluación del sistema de control

Esta evaluación se realizó en dos etapas, una primera antes de poner en funcionamiento la caldera, esta arrojó los siguientes resultados:

En general el sistema de control es el adecuado para las características de fabricación de la caldera como son: presión máxima de trabajo (150 psi) y capacidad de generación de vapor (3450 lbs/hr), aunque se pudo observar que la mayoría de los sensores transmisores como los presostatos de seguridad y operación, switch de aire son accionados con ampollas de mercurio, material que está siendo removido gradualmente de las industrias por la peligrosidad que este lleva tanto a la salud como al medio ambiente, además de ser propensos a falsas activaciones.

También se observó que el manómetro principal se encuentra gravemente deteriorado, al punto que no puede dar lectura de la presión a la cual está sometida la caldera, lo que representa un riesgo tanto para el equipo como para el operario.

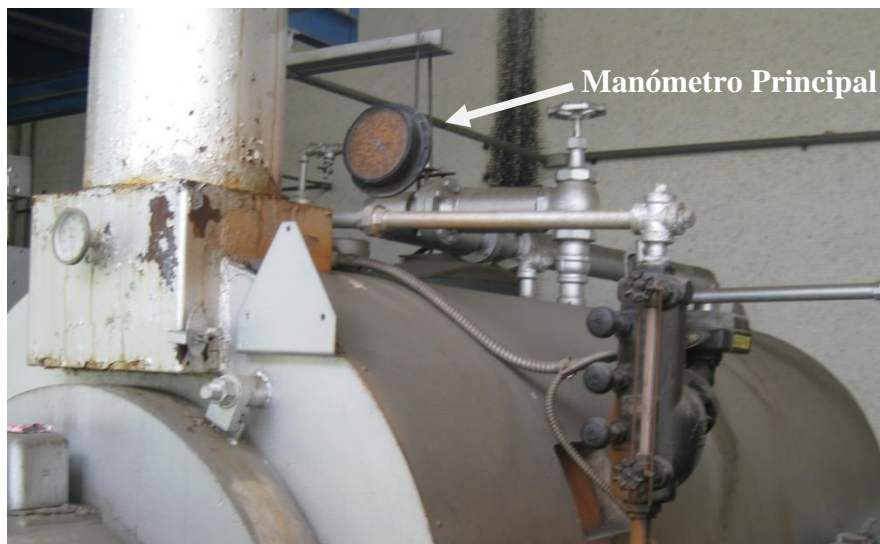


Figura N°8 Estado de deterioro del manómetro principal. (Tomado de la caldera de LOU).

Con respecto al control de nivel, se pudo verificar que es un modelo 150S McDonnell & Miller, es un elemento bastante moderno y confiable el cual trabaja libre de mercurio. Otro punto importante en la instrumentación de la caldera es el control de llama, que a su vez cuenta con el número requerido de válvulas de seguridad (apertura lenta cierre rápido) como elemento final de control.

La única anomalía que se notó en el sistema de control específicamente en el lazo de control de llama, fue la falta de sensores de alta y baja presión de combustibles necesarios para un funcionamiento seguro y exigido por la norma venezolana COVENIN 2217-84 de generadores de vapor. Dichos sensores transmisores van ubicados en el tren de gas y son los encargados de enviar una señal al controlador en caso de que exista una subida brusca en la presión de combustible o en caso contrario una disminución en el mismo.

4.4.-Arranque de la caldera

Para dar cumplimiento a este objetivo se tomaron acciones correctivas de todos aquellos desperfectos y anomalías observadas en las evaluaciones realizadas.

Para encender la caldera había que corregir los problemas de fuga en los tubos de humo y sustituir el registro de mano el cual se encontraba roto, de igual forma se procedió con el resto de las empacaduras.

En la corrección de fugas de los tubos de humo se procedió según la norma venezolana COVENIN 2262-91. Generadores de Vapor, Reparaciones y Alteraciones, la cual establece para estos casos condenar los tubos afectados siempre y cuando dicha cantidad de tubos no supere el 10% de la totalidad, lo que no constituyó un problema, ya que solo tres (3) tubos de un total de 78, resultaron dañados, lo que representa solo un 3.48%.

Como se puede ver en la figura N° 9, cuando se condensa un tubo de humo en una caldera, se procede a sellarlo por ambos extremos, de tal forma que el agua quede retenida dentro del tubo, de esta forma el tubo en cuestión no aportará a la transferencia de calor.



Figura N° 9. Trabajo de reparacion en tuberias.

Una vez corregido el problema de las fugas de agua, se tomaron acciones para solventar los problemas existentes en el sistema de control, los cuales fueron mencionados en la evaluación preliminar.

Dichos cambios consisten principalmente en la sustitución de todos aquellos elementos que contaban con materiales tóxicos (mercurio) como parte de sus componentes y de todos aquellos elementos que estaban deteriorados. Incorporando posteriormente nuevos elementos a la cadena de control.

Los elementos sustituidos se pueden ver en las siguientes tablas:

TablaN° 5. Componentes de control sustituidos en la caldera

Presostato de seguridad	
Anterior	Nuevo
Honeywell L404A	Honeywell L404T
Activado por ampolla de mercurio	Activado por micro switch
Switch de Aire	
Anterior	Nuevo
Honeywell L4049	Honeywell C6097
Activado por ampolla de mercurio	Activado por micro switch

Los elementos incorporados al circuito de control se pueden ver en la siguiente tabla:

Tabla N°6. Componentes de control incorporados en la caldera

Switch de alta presión de combustible	Honeywell C6097A	12 a 60 plg de H ₂ O
Switch de baja presión de combustible	Honeywell C6097B	0,4 a 5 plg de H ₂ O

Estos equipos se pueden apreciar en el Apéndice B.

Una vez sustituidos estos equipos y solucionado el problema con las fugas de agua se dio inicio al encendido seguro de la caldera, el cual se efectuó sin ningún problema. Se realizaron ciclos completos de presurización a diferentes presiones empezando por bajas presiones hasta presiones más altas en un rango comprendido desde 20 psi hasta 80 psi, esto con la finalidad de ir monitoreando a diferentes

presiones el comportamiento de los elementos de control así como los trabajos mecánicos efectuados.

Luego de encendida la caldera por un lapso de 1 semana, se realizó la segunda etapa de las pruebas en los elementos de control, los resultados obtenidos fueron descargados en el formato exigido por INPSASEL para calderas piro tubulares.

Se realizaron pruebas como:

- Detección de llama
- Disparo de válvula de seguridad
- Disparo por paro de ventilador
- Nivel de agua
- Barrido del horno

También se reportaron las condiciones físicas y de seguridad en la caldera.

El resultado de las pruebas fue satisfactorio, ya que todos los elementos de control respondieron de la manera esperada, garantizando así un funcionamiento seguro y óptimo de la caldera. Las pruebas en detalle se pueden ver en el apéndice C.

El resultado del análisis de combustión fue el siguiente:

	O₂	CO₂	% Eficiencia
Rango de valores	4% al 10%	11% al 12.5%	80% al 85%
Valores obtenidos	9%	11%	81%

Tabla N° 7 Resultado de Análisis de humos de combustión

4.5- Manual de procedimientos para la puesta en funcionamiento de la caldera.

Este manual se realizó bajo el mismo formato de un manual ya existente elaborado por el profesor Jesús Rosales en el año 2003 y aprobado por los profesores, José Fernández y Valentino Salvatore, el cual lleva por título “INSTRUCTIVO DE OPERACIÓN DEL SISTEMA DE GENERACION DE

VAPOR DEL LABORATORIO DE OPERACIONES UNITARIAS”. Se elaboró bajo este mismo formato con la finalidad de poder anexarle el capítulo referente a la caldera a dicho manual, para que quede registrado todos los cambios realizados a la caldera en este Trabajo Especial de Grado, así como los procedimientos a realizar por la persona encargada de encender la caldera para asegurar un funcionamiento seguro tanto para el operario como para el equipo.

El manual contiene información referente a:

- Descripción general del equipo así como de sus componentes
- Procedimiento de encendido y apagado seguro
- Procedimiento y régimen de purga

Este manual se puede estudiar con mayor precisión en el apéndice A.

Después de haber logrado los objetivos planteados, se consideró necesario realizar una evaluación general a la línea de tuberías de vapor que va desde la sala de generación de vapor, donde está ubicada la caldera hasta el laboratorio de operaciones unitarias, con el objeto de garantizar el transporte seguro del vapor generado. La evaluación permitió determinar el estado general de las tuberías, de las válvulas y del aislante térmico que recubre la tubería.

La evaluación practicada arrojó como resultado que las línea de tubería se encuentra en buenas condiciones, excepto por una fuga detectada en el tramo subterráneo localizado a nivel de la caminería, la fuga queda en evidencia tras el encendido de la caldera y posterior apertura de la válvula principal de vapor.

Aún y cuando la fuga detectada no tiene mayor impacto sobre la presión de vapor que la caldera suministra al laboratorio de operaciones unitarias, tal y como se observa en Apéndice B, se recomienda tomar las acciones pertinentes para la corrección de la fuga.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES

En el presente capítulo se presentan las conclusiones obtenidas en este Trabajo Especial de Grado basadas en el análisis y discusión de resultados.

- El trabajo realizado en la Caldera del Laboratorio de Operaciones unitarias, permite concluir que es de vital importancia diseñar un plan de mantenimiento preventivo, el cual debe contemplar la revisión de todos los elementos presentes en la caldera con lapsos no mayores a un año.
- Es de suma importancia la utilización de un Desgasificador o de un secuestrante de oxígeno que permitirán alargar la vida de la tubería interna de la caldera, ya que previene de una forma eficaz su deterioro producto del proceso de corrosión.
- La alimentación con aguas duras a la caldera no representa mayor problema de incrustaciones, siempre y cuando la caldera se mantenga trabajando a medianas presiones y por cortos lapsos de tiempo. Como en el caso de la caldera del L.O.U.
- Un mantenimiento preventivo adecuado, un tratamiento de agua eficiente, y un sistema de control que funcione adecuadamente garantiza un funcionamiento seguro y óptimo de la caldera.

CAPÍTULO VI

RECOMENDACIONES

En la búsqueda de realizar futuras mejoras en el ciclo de generación de vapor en el L.O.U., de las realizadas en el presente Trabajo especial de Grado, se presentan las siguientes recomendaciones que pueden ser empleadas en las próximas versiones de este trabajo.

- A fin de poner en marcha el circuito de tratamiento de agua para la alimentación de la caldera se recomienda hacer la instalación del filtro antes de la batería de suavizadores
- Dar entrenamiento adecuado al personal que opera la caldera.
- Revisar detalladamente por parte del personal técnico del laboratorio el manual entregado en este trabajo de grado.
- Introducir una línea de retorno de condensado en el circuito de vapor para elevar la temperatura en el tanque de agua de alimentación
- Implementar un sistema de tratamiento para la remoción del oxígeno.
- Sustituir el sistema de flotante en el tanque de alimentación de agua.
- Hacer las reparaciones necesarias al sistema de iluminación en el cuarto de generación de vapor


CAPÍTULO VII

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Catalán, J. (1969). **Química del agua**. Barcelona, España: Blume.
- COVENIN 2217-84 “**Generadores de vapor**” **Norma Venezolana**. 1985.
- COVENIN 2262-91 “**Generadores de vapor reparaciones y alteraciones**” 1980.
- Incropera, F. y De Witt, D. (1999). **Fundamentos de transferencia de calor (4ta edición)**. México: Prentice Hall
- Llorens, M. y Miranda, A. (1999). **Ingeniería Térmica**. Barcelona, España : Ceac.
- Medina, L.; Zea, L. “Determinación de los parámetros físico-químicos que favorecen la formación de incrustaciones en superficies de hierro, simulando el comportamiento de aguas de producción”. Trabajo especial de grado. Universidad Central de Venezuela. Caracas, Venezuela, 2008.
- Necati Öziskik, M. “**Transferencia de calor**”. McGraw-Hill Latinoamericana S.A. 1979.
- Shield, C. (1982). **Calderas: Tipos, Características y sus Funciones (10ma edición)**. México:Continental.
- Smith, C y Corripio A. (2006). **Control Automático de Procesos**. Mexico, D.F.: Limusa,S.A

- Wark, K. y Richards D. (2001). **Termodinámica (6ta edición)**. Madrid, España : McGraw-Hill.
- “Water Hardness”. [Página Web en línea] Disponible: <http://hydrotec.readywebdesign.co./portals/0/pdfdownloads/pdfs%20infocentre/hard%20water/waterhardness.pdf>.
- WELTY, James; Charles Wicks y Robert Wilson. “**Fundamentos de transferencia de momento, calor y masa**”. Limusa. 8^{va} edición. 1997servens.
- W. H. Severns y H. E. Degler (1975).**Energía mediante Vapor Aire o Gas**. Barcelona, España: *Editorial Reverte*

APÉNDICE A

 <p>Ingeniería Química UCV</p>	<p>INSTRUCTIVO DE OPERACIÓN DEL SISTEMA DE GENERACION DE VAPOR DEL L.O.U.</p>	
---	--	--

1. OBJETIVO

Describir el procedimiento de operación de la caldera, para el suministro de Vapor al laboratorio de operaciones unitarias

2. ALCANCE.


Aplicado a la caldera y sus componentes durante el servicio

3. RESPONSABILIDAD.

Ingenieros y/o técnicos encargados del laboratorio de operaciones unitarias (L.O.U).

4. IMPLEMENTOS DE SEGURIDAD

- Bata de laboratorio o braga
- Zapatos de seguridad
- Protectores auditivos

	INSTRUCTIVO DE OPERACIÓN DEL SISTEMA DE GENERACION DE VAPOR DEL L.O.U.	
---	---	--

5 DESCRIPCION DEL EQUIPO.

5.1 Una caldera marca continental (B1) (ver especificaciones del fabricante Figura 4), la cual está conformada por los siguientes elementos:

5.1.1. Un cajetín de control (CB1-01). Ver (lámina: plano 5) formado por:

- 4.1.1.1 Un switch de encendido y apagado (SS1-01).
- 4.1.1.2 Un switch selector de combustible (inhabilitado, SS1-02).
- 4.1.1.3 Un indicador visual de encendido (bombillo, VII-02).
- 4.1.1.4 Indicador visual de alarma por detección de llama en la caldera (bombillo, VII-02).
- 4.1.1.5 Indicador visual de alarma por bajo nivel de agua en la caldera (bombillo, VII-03).
- 4.1.1.6 Un indicador sonoro de alarma por bajo nivel de agua en la Caldera (SI1).

5.1.2 Un motor ventilador de tiro forzado de 5 HP (MV1)

5.1.3 Una columna de verificación de agua compuesta por:

- 5.1.3.1 Un control de nivel de agua marca McDonell & Miller (LC1).
- 5.1.3.2 Una válvula de compuerta 1", para purga principal, presión de diseño 150 psi (V1-07).

5.1.4 Dos válvulas de purga de fondo:

- 5.1.4.1 Válvula de purga rápido (tipo cuchilla) de 1 ½" (V1-15)
- 5.1.4.2 Válvula de purga lenta (tipo Y) de 1 ½" (V1-16).



**INSTRUCTIVO DE OPERACIÓN
DEL SISTEMA DE GENERACION
DE VAPOR DEL L.O.U.**

- 5.1.5 Una válvula de seguridad; conexión 1 ½” x salida 2”(VI-08),150 psi de presión de diseño, dispara a 150 psi cierra a 120 psi.
- 5.1.6 Dos válvulas tipo compuerta de 3” para suministro de vapor (V1-09 y V1-10).
- 5.1.7 Dos sensores de presión marca HONEYWELL (micro switch).
 - 5.1.7.1 Indicador de presión de operación 40 psi (MPI1-01)
 - 5.1.7.2 Indicador de presión seguridad 60 psi (MPI-02).
- 5.1.8 Un Termómetro para gases de combustión ubicado en la chimenea Con rango de 100 – 500 °C y 2 ½” diámetro (TI1.01).
- 5.1.9 Un manómetro principal de presión de vapor con rango de 0-300 psi ,4” de diámetro, conexión 1/4” NPT (PI1-03).
- 5.2 Un sistema de alimentación de agua a la caldera ,compuesto por:
 - 5.2.1. Un tanque de 507 litros de capacidad (TK1-02) provisto de:
 - 5.2.1.1. Una válvula de paso principal de agua pre-tratada, tipo compuerta De 1 ¼” (V1-17).
 - 5.2.1.2. Tres (03) válvulas de compuerta de ¾” , alimentación al tanque En diferentes niveles de altura.(V1-18, VI-19 y V1-20)
 - 5.2.1.3. Una válvula tipo compuerta de 1 ¼” ubicada en la succión de la bomba. (V1-11).
 - 5.2.1.4. Un filtro tipo Y de 1 ¼” ubicado en la succión de la bomba.(F1).
 - 5.2.1.5. Una válvula de compuerta de 1” ,para purga de fondo(V1-21)



**INSTRUCTIVO DE OPERACIÓN
DEL SISTEMA DE GENERACION
DE VAPOR DEL L.O.U.**

- 5.2.1.6 Un termómetro para la temperatura del agua dentro del tanque 0-250°F, 2" diámetro. (TI1-02).
- 5.2.1.7 Un cajetín de control para la bomba (CB1-01)
- 5.2.2. Una bomba de turbina con motor de 7,5 HP/5, 5 Kw, 220, trifásico Marca Siemens (P1)
- 5.2.3. Dos (2) válvulas check (swing check) de 1 ¼" (V1-12 y V1-13).
- 5.2.4. Un válvula de paso rápido de 1 ¼", para la entrada de agua de la caldera (V1-14).
- 5.3. Un sistema de alimentación de combustible compuesto por:
 - 5.3.1. Un tanque de almacenamiento (bombona), que soporta una presión máx. De 300 psi, ubicado en la parte externa de la sala previsto de:
 - 5.3.1.1 Un manómetro para presión de tanque de combustible, con rango de 0-300 psi (PI1-01).
 - 5.3.1.2. Una válvula múltiple de tres vías (habilitada solo una vía con llave para el paso de combustible. (VM1).
 - 5.3.1.3. Un regulador de gas con presión máxima de entrada de 400 psig y rango de salida de 0-50 psig. (GR1-01).
 - 5.3.2. Una válvula reguladora de gas con orificio de ½", conexión de 2", marca ROCKWELL presión de entrada 60 psi presión salida 0-50 in H₂O.



**INSTRUCTIVO DE OPERACIÓN
DEL SISTEMA DE GENERACION
DE VAPOR DEL L.O.U.**

- 5.3.3 Una bifurcación en la línea de gas que va hacia el piloto de la caldera, compuesta por:
- 5.3.3.1. Una válvula de paso rápido de ½” (V1-02)
 - 5.3.3.2. Un regulador de gas de ½” (GR1-03)
 - 5.3.3.3 Dos (2) Válvulas solenoide de ½” (V1-05 y V1-06)
- 5.3.4 Un manómetro de baja presión en tren de gas con rango 0-100 inH₂O (PI1-02).
- 5.3.4 Un sensor de baja presión de combustible marca HONEYWELL. Ver figura 11C
- 5.3.5 Una válvula de paso rápido de 2 ½” (V1-01)
- 5.3.6 Dos (2) válvulas de seguridad (apertura lenta cierre rápido) de 2 ½” en tren de gas.(V1-03 y V1-04).
- 5.3.7 Un sensor de alta presión de combustible marca HONEYWELL. ver figura 11C
- 5.3.8 Una válvula tipo mariposa a la entrada del quemador.
- 5.3.9 Switch de aire marca Honeywell. Ver. figura 5



**INSTRUCTIVO DE OPERACIÓN
DEL SISTEMA DE GENERACION
DE VAPOR DEL L.O.U.**

6. MEDIDAS DE SEGURIDAD

- 6.1. Verifique que la presión del tanque de combustible sea suficiente para realizar la operación, para esto revise que el manómetro ubicado sobre la superficie del tanque este marcando una presión superior a 10 psi. Ver figura 11A .
- 6.2. Verifique que las siguientes válvulas estén cerradas por completo:
 - 6.2.1. Purga de fondo de la caldera (V1-15 y V1-16)
 - 6.2.2. Purga principal de la columna de nivel de agua (V1-07)
 - 6.2.3. Suministro de vapor
- 6.3. Verifique que las siguientes válvulas estén abiertas por completo.
 - 6.3.1. Paso de combustible, ver figura 11(A y B).
 - 6.3.1.1 Salida del tanque de combustible (VM1)
 - 6.3.1.2 Entrada al tren de gas (V1-01)
 - 6.3.1.2 Entrada hacia el piloto (V1-02)
 - 6.3.2. Entrada de agua al tanque de alimentación (V1-17, V1-18, V1-19).
 - 6.3.3. Entrada de agua a la caldera (V1-14), ver figura 10 D.
 - 6.3.4. Válvulas de vidrio de nivel ubicado en el control de nivel (McDonnell & Miller), ver figura 6.



**INSTRUCTIVO DE OPERACIÓN
DEL SISTEMA DE GENERACION
DE VAPOR DEL L.O.U.**

6.4 Coloque en encendido los siguientes interruptores

6.4.1 Interruptor principal (BREAKER).

6.5 Alimentación de corriente al cajetín de control; verifique que esté encendido el bombillo en el tablero principal de la caldera.

6.6 Verifique el nivel de agua en la caldera, revisando el vidrio indicador de nivel del McDonnell & Miller y verificando que éste en el nivel óptimo.

6.7 Verifique el nivel de agua en el tanque de alimentación, ver figura 10.

6.8 Accione los switch de alta y baja presión de combustible.



NOTA: asegúrese de que la bomba éste funcionando correctamente.

7. PROCEDIMIENTO PARA EL ARRANQUE EN FRÍO.

7.1 ENCENDIDO.

7.1.1. Coloque en encendido el interruptor en la caldera, ver figura 5.

7.1.2. Espere cuidadosamente que la caldera arranque. Aprox. 1.5 min.

7.1.3. Verifique que se haya encendido la llama principal, observar por la mirilla de la puerta trasera o delantera.

7.1.4. Apague la caldera, colocando el interruptor en posición de apagado dejar así por espacio de tres (3) min.



**INSTRUCTIVO DE OPERACIÓN
DEL SISTEMA DE GENERACION
DE VAPOR DEL L.O.U.**

▲ NOTA: Es necesario hacer procedimiento de arranque en frío cada vez que la caldera se deje sin trabajar por más de 2 días consecutivos, este es un procedimiento de pre-calentamiento y es utilizado para evitar grietas en el muro refractario de la caldera.

7.1.5. Vuelva a encender la caldera.

7.1.6. Cuando el manómetro principal marque 40 psi realice una purga de fondo, siga cuidadosamente las siguientes instrucciones:

7.1.6.1 Abra la completamente la válvula tipo Y (V1-16).

7.1.6.2 Abra lentamente la válvula de purga rápida (V1-15) por aproximadamente por 5 seg, vuelva a cerrar, cierre válvula tipo Y.

▲ NOTA: Recordar que al realizar el proceso de purgado se está dejando salir agua de la caldera provocando así un descenso en el nivel. Una purga prolongada (mayor a 20 segundos aproximadamente) ocasionará el apagado de la caldera.

7.1.7 Deje funcionando la caldera hasta que llegue a su presión de trabajo, la misma se apagará automáticamente y volverá a encender una vez disminuya la presión. A esto se le llama ciclos de trabajo y los realizará el tiempo que esté encendida.

7.1.8 Una vez la caldera llegue a la presión de trabajo, **Abra muy lentamente** la válvula principal de suministro de vapor.

▲ NOTA: Una rápida apertura de la válvula principal del suministro de vapor ocasionará golpes de ariete representando peligro de ruptura en la tubería.



**INSTRUCTIVO DE OPERACIÓN
DEL SISTEMA DE GENERACION
DE VAPOR DEL L.O.U.**

7.2 APAGADO

- 7.2.1. Coloque en apagado el interruptor de la caldera.
- 7.2.2. Cierre completamente la válvula principal de vapor.
- 7.2.3. Realice una purga de fondo siguiendo el procedimiento ya descrito.
- 7.2.4. Cierre las válvulas (VM1, V1-14, V1-18).
- 7.2.5 Realice las indicaciones dadas en el paso 6.2 de las medidas de seguridad.
- 7.2.5 Coloque en apagado el breaker principal.

FIG.5. Caldera (Vista Frontal)

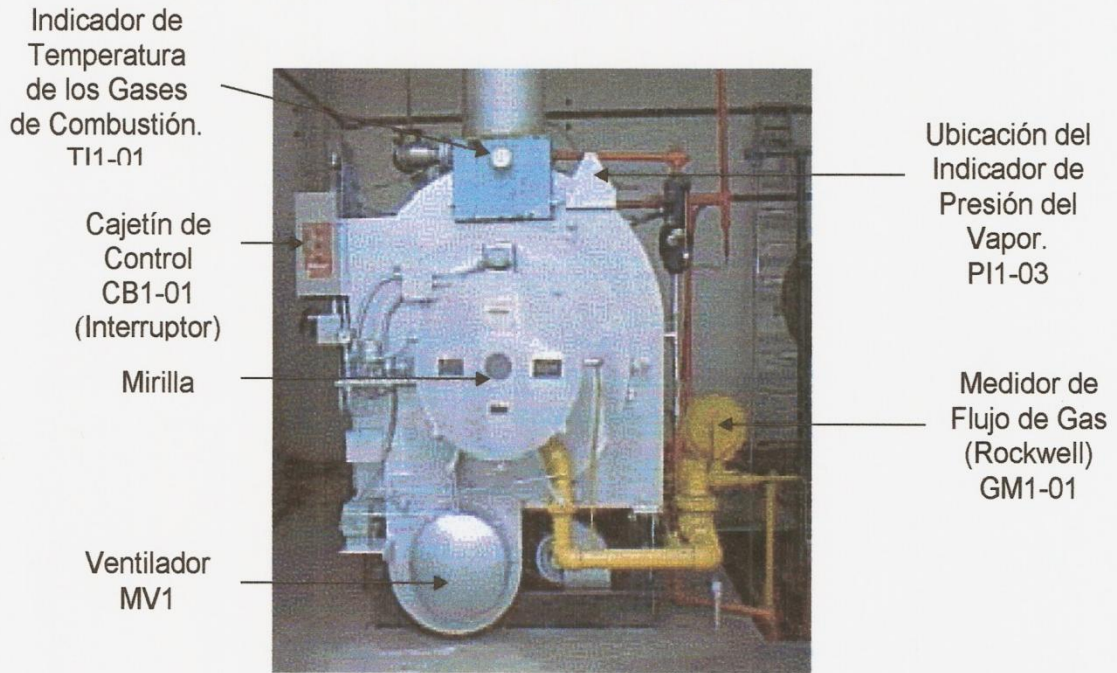


FIG.6. Columna Hidrométrica

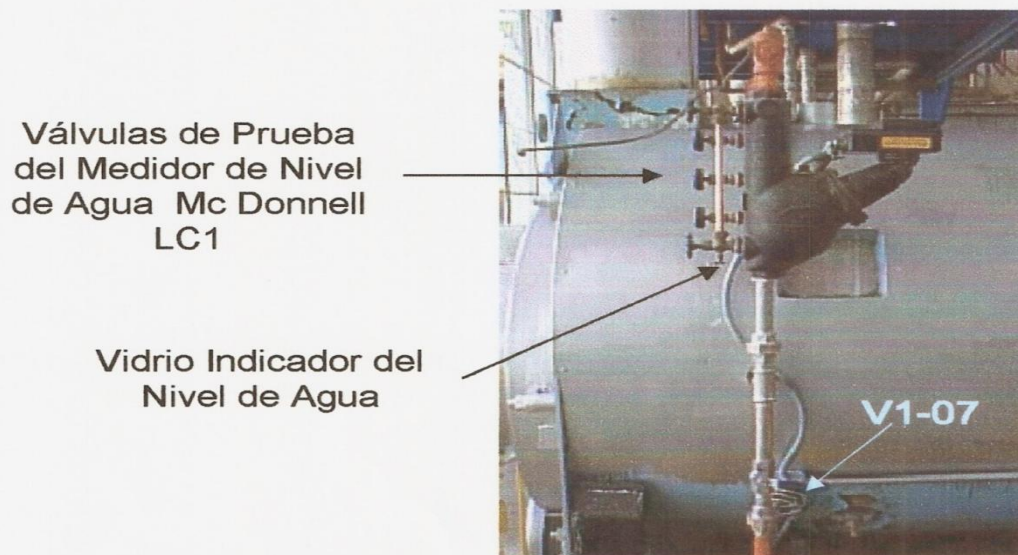


FIG.7. Purga de Fondo de la Caldera



FIG.8. Caldera (Vista Superior)

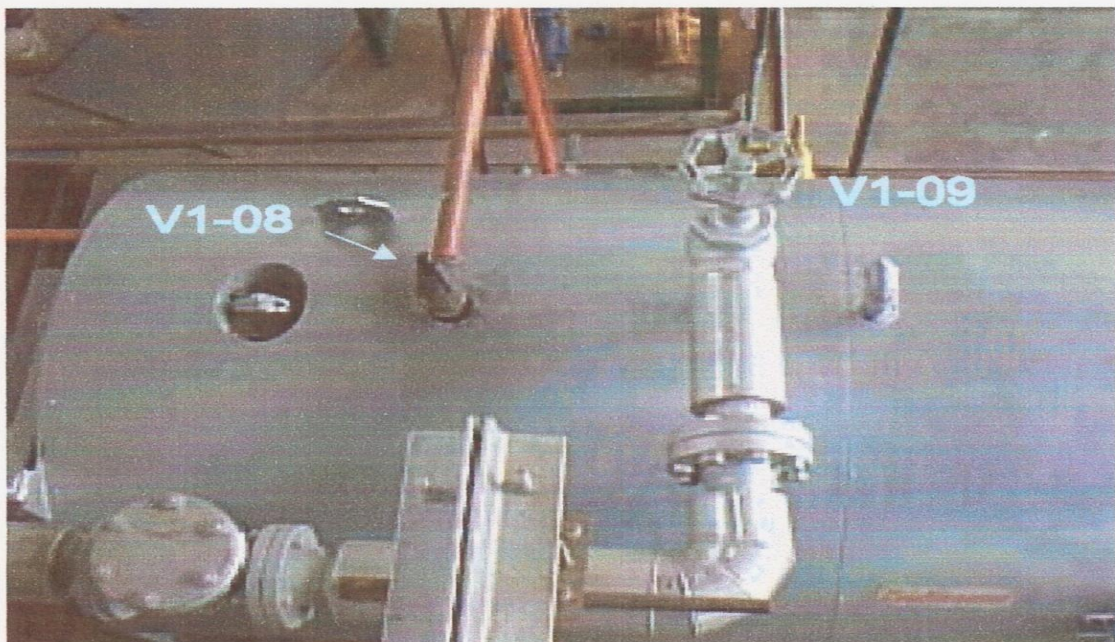


FIG.9. Panel de Control de la Caldera

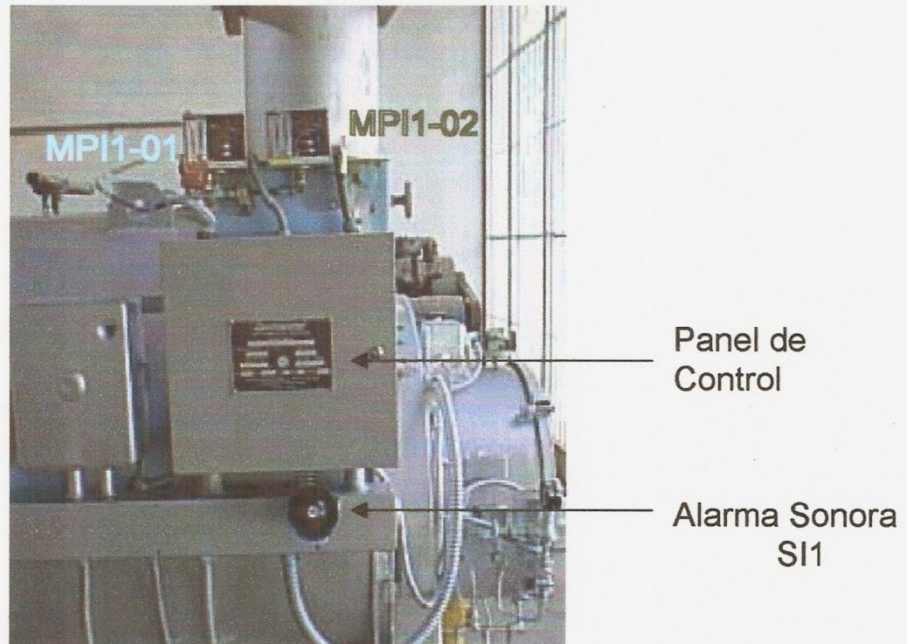


FIG.10. Sistema de Alimentación de Agua a la Caldera

FIG.10.A. Tanque de Almacenamiento de Agua de la Caldera.

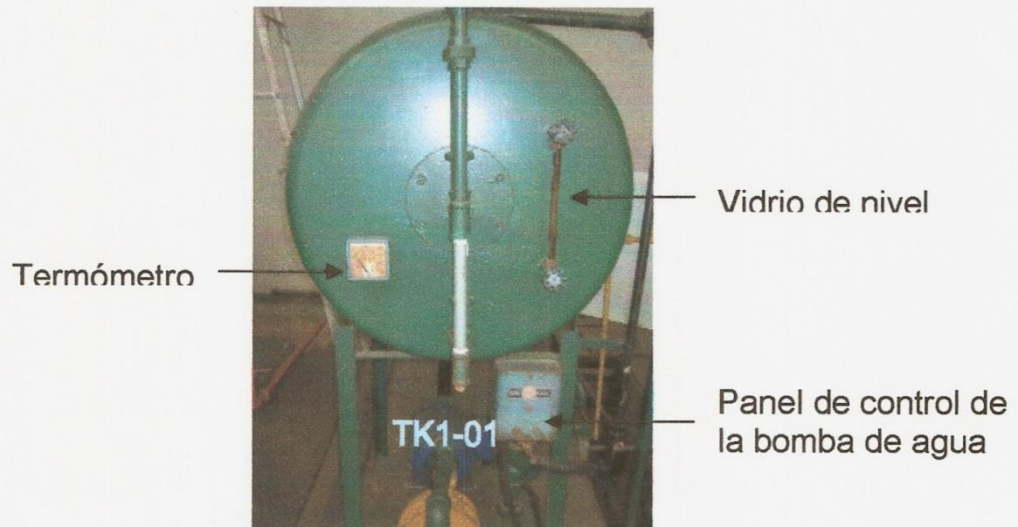


FIG.10.B. Válvula de Salida del Agua almacenada ubicada en la succión de la bomba.

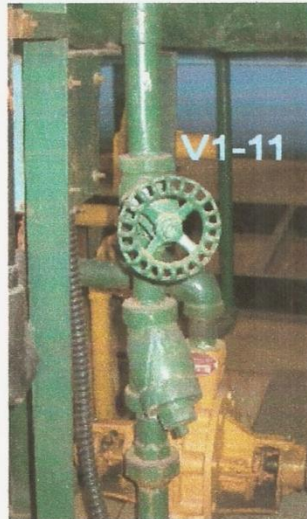


FIG.10.C. Purga del Tanque de Alimentación.



FIG.10.D. Válvula de Alimentación de Agua a la Caldera.

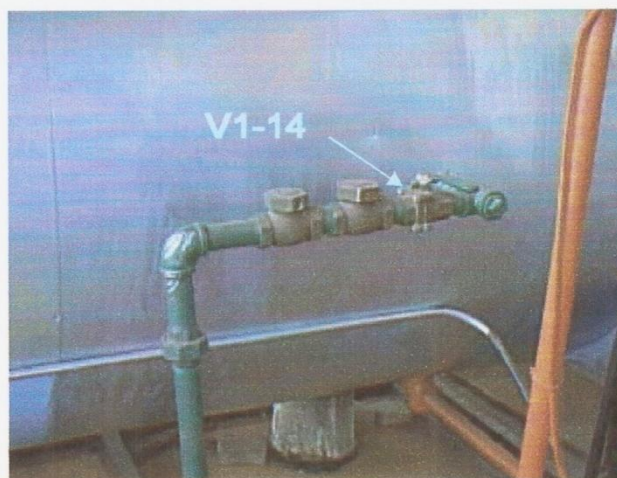


FIG.11. Sistema de Alimentación de Combustible de la Caldera.

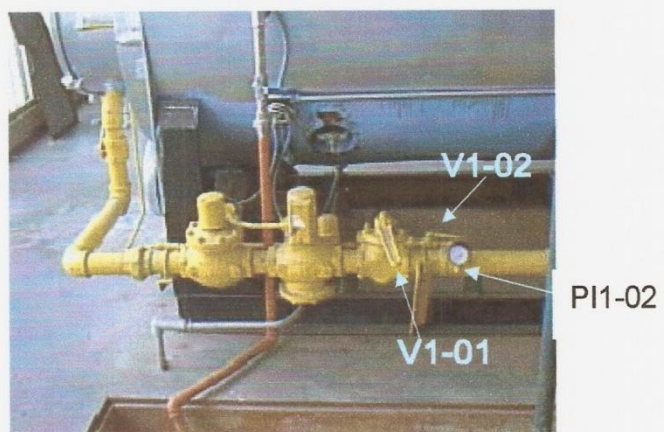
FIG.11.A. Tanque de Almacenamiento de Combustible.



FIG.11.B. Sistema de Salida del Tanque de Combustible



FIG.11.C. Línea de Suministro de Combustible a la Caldera





**INSTRUCTIVO DE OPERACIÓN
DEL SISTEMA DE GENERACION
DE VAPOR DEL L.O.U.**

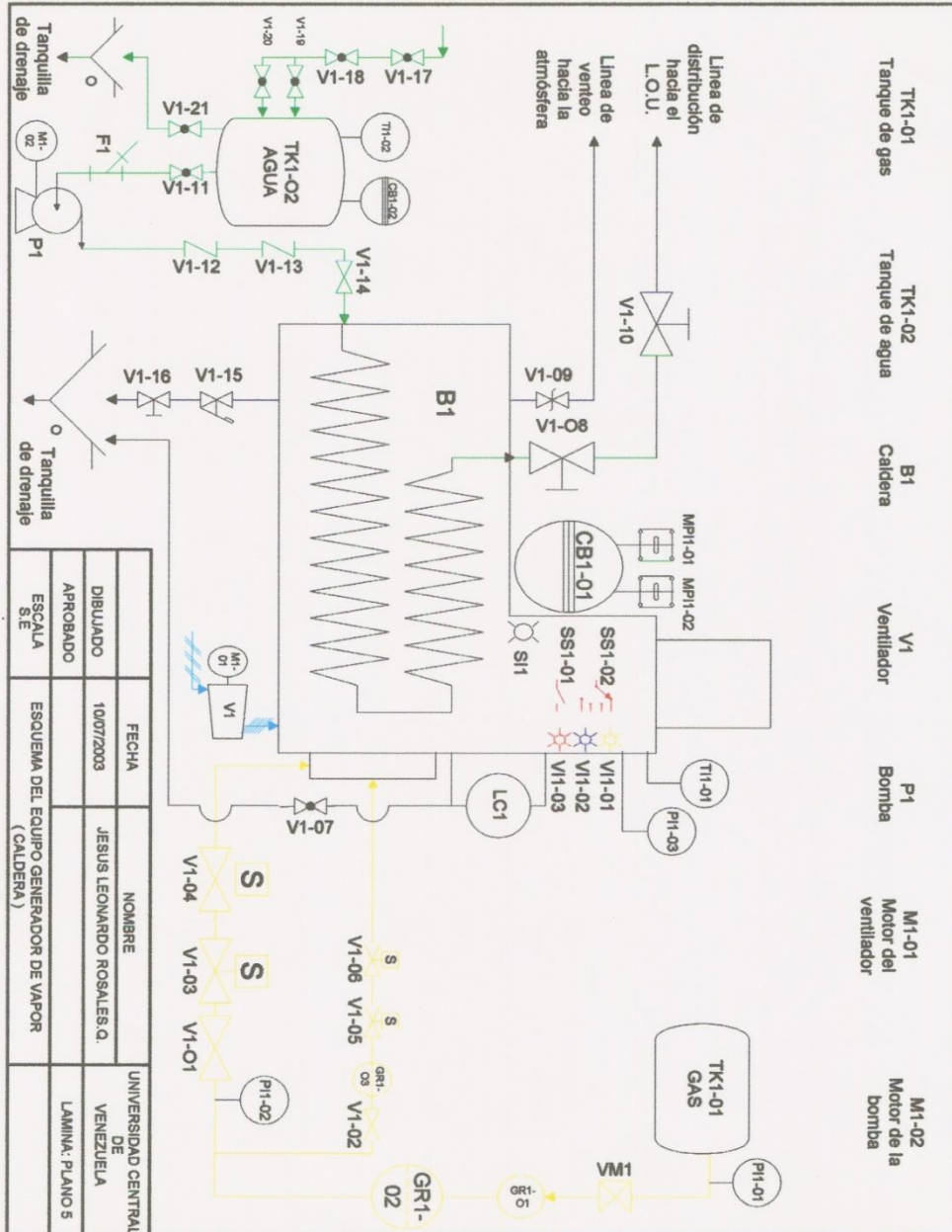
Inspección Diaria

Operario _____ Fecha: __/__/__

Caldera: Operativa _____ Stand by _____ Apagada _____

- a) Registros: Frontales _____ Laterales _____ Superiores _____
- b) Nivel de Agua Caldera _____ Encendido _____ cm Apagado _____ cm
- c) Tanque Alimentación de Agua _____ Temperatura _____ C°
- d) Control de Bomba _____
- e) Color de llama _____
- f) Temperatura placa trasera _____ Temperatura Chimenea _____ C°
- g) Presión : encendido _____ psi Apagado _____ psi
- h) Línea Tuberías Vapor _____ Agua _____
- i) Tanquilla de Purga _____
- j) Recorrido General _____

Obsevaciones: _____



APÉNDICE B

Figuras

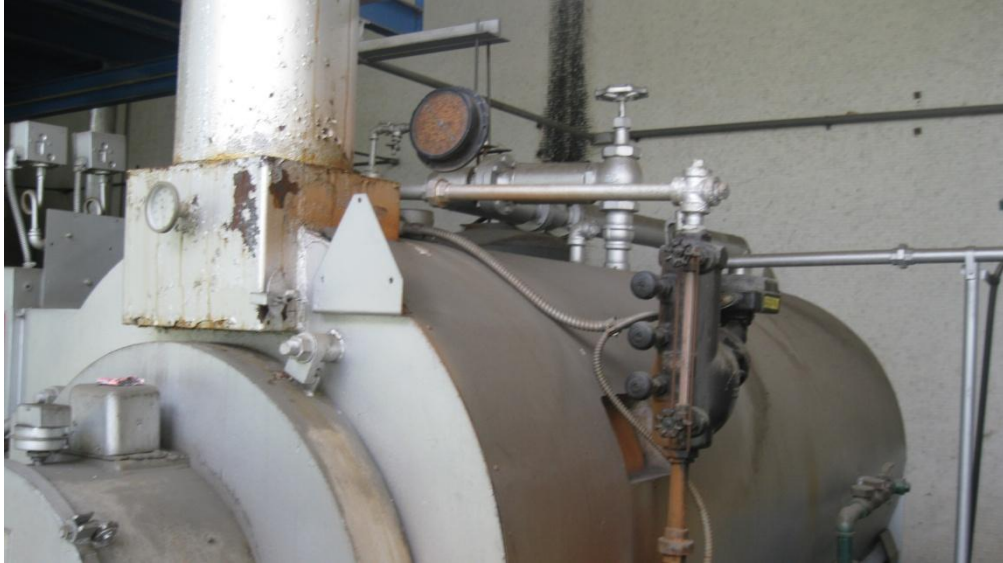


Figura N° 10 Estado exterior de la caldera



Figura N° 11 Deterioro en cuerpo de la caldera

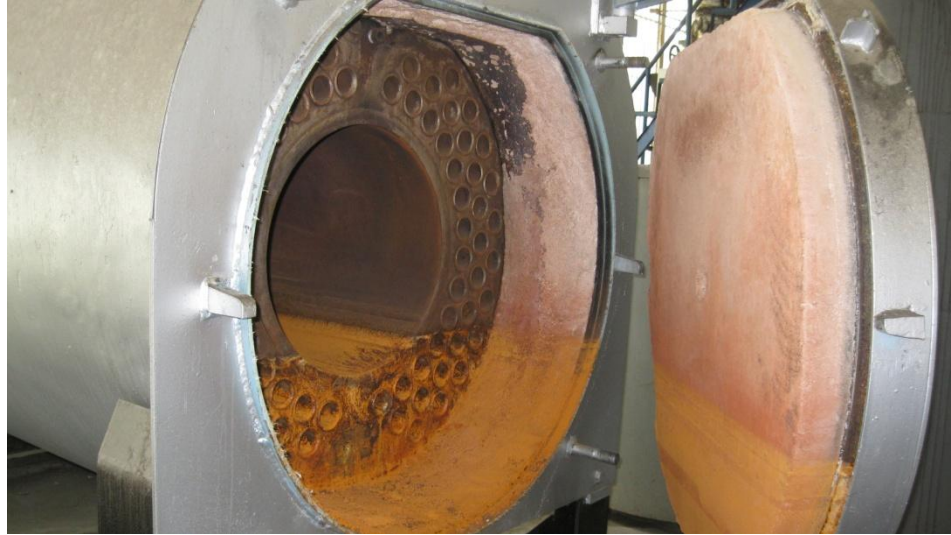


Figura N° 12. Estado interno de la caldera (puerta trasera).



Figura N° 13. Estado del tren de gas.



Figura N° 14. Grietas en registro de mano



Figura N° 15. Bomba manual tipo pistón .



Figura N° 16. Presiones alcanzadas durante prueba hidrostática.

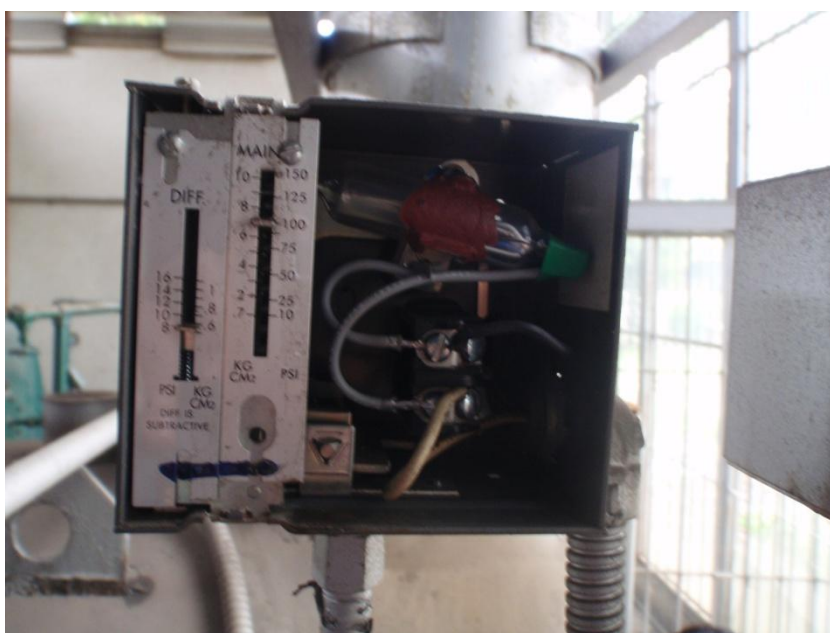


Figura N° 17. Presostato accionado por ampolla de mercurio

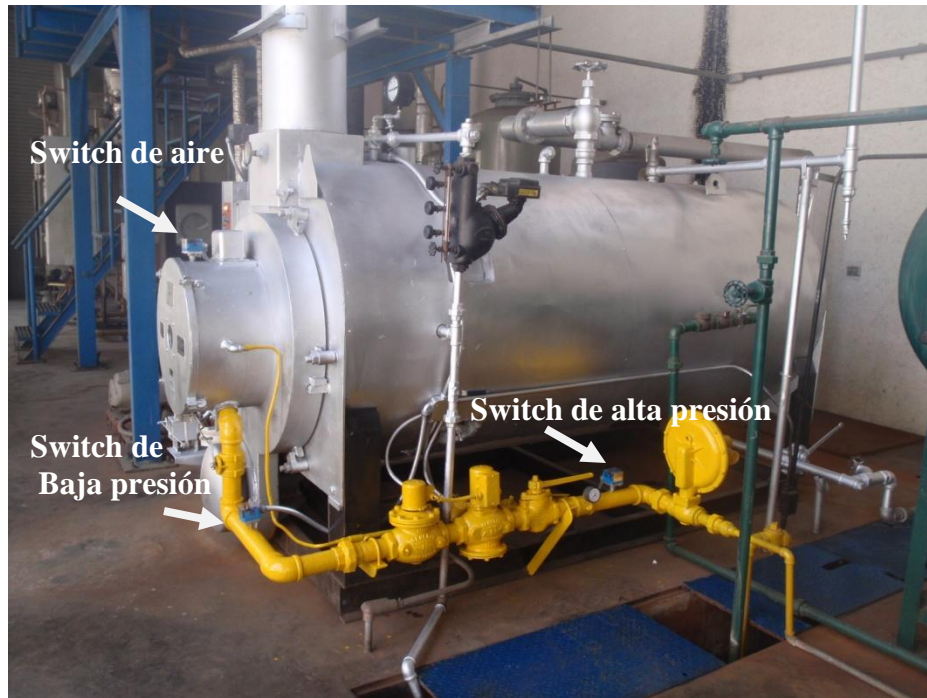


Figura N° 18. Elementos incorporados al tren de gas



Figura N° 19 Presostato accionado por micro switch



Figura N° 20 Presencia de vapor en tuberías del LOU



Figura N° 21 Intercambiador de calor para realización de práctica.

