

UNIVERSIDAD DE ORIENTE
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA



**“ PROPUESTA DEL DISEÑO CONCEPTUAL Y BÁSICO DE UNA CALDERA DE
RECUPERACIÓN DE CALOR PARA LA GENERACIÓN EN UNA PLANTA
TERMOELÉCTRICA”**

Realizado por:

ROI, FERNÁNDEZ
FRANCIS, PAYARES

Trabajo de Grado presentado ante la Universidad de Oriente como requisito
parcial para optar al título de:

INGENIERO QUIMICO

Barcelona, Abril de 2011

**UNIVERSIDAD DE ORIENTE
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA**



**“ PROPUESTA DEL DISEÑO CONCEPTUAL Y BÁSICO DE UNA
CALDERA DE RECUPERACIÓN DE CALOR PARA LA
GENERACIÓN EN UNA PLANTA TERMOELÉCTRICA ”**

ASESOR ACADÉMICO

Ing. Petróleo. José, Rondón

Barcelona, Abril de 2011

**UNIVERSIDAD DE ORIENTE
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA**



**“ PROPUESTA DEL DISEÑO CONCEPTUAL Y BÁSICO DE UNA
CALDERA DE RECUPERACIÓN DE CALOR PARA LA
GENERACIÓN EN UNA PLANTA TERMOELÉCTRICA ”**

JURADO

**Ing. Petróleo. José, Rondón
Jurado Principal**

Barcelona, Abril de 2011

RESOLUCIÓN

De acuerdo al artículo 41 del Reglamento de Trabajo de Grado

“Los Trabajos de Grado son exclusiva propiedad de la Universidad y solo podrán ser utilizados a otros fines con el consentimiento del Consejo de Núcleo respectivo, quien lo participará al Consejo Universitario”

DEDICATORIA

- A la memoria de mi padre Dr. José Antonio Fernández Lozano, quien fue mi estímulo para cumplir esta meta.
- A mi madre Lucia Salinas de Fernández, por su ayuda incondicional y por estar siempre conmigo.
- A mi hermano Brais Fernández Salinas, por brindarme su apoyo y ayuda.

Roi Fernández

DEDICATORIA

- Toda mi obra, palabra por palabra, está dedicada a mis amados padres:
Gisela Romero y Hogward Payares.

Francis Payares

AGRADECIMIENTOS

- A la Universidad de Oriente, por darme la oportunidad de formarme como profesional.
- A mi compañera de monografía Francis Payares por tenerme paciencia.
- Especial agradecimientos a mi compañero ingeniero Andrés Orozco por brindarme su ayuda y tiempo en el trascurso de las areas muchas gracias mi pana.
- A mis compañeros de estudios y otros compañeros con los que tuve la dicha de compartir esos días de universidad, entre ellos Julio Palacios, Andrés Orozco, Jimmy Sierra, Alexandra Torres, Carlos Chacon, Geovanny Rocca, Karol Guzman entre otros, que no recuerdo y que no puedo ponerlos a todos.
- A mis compañeros de las areas Francis Payares, Alexandra Torres, Thamara Suniaga, Richard Dimas, Lorena Perez, Xiomara Gariques, Francisco Castillo, Albany Lezama, Carmen Salazar, Yetzania Lorez, Pierre Camiso, con los que pase mis últimos días de clase en la UDO, tuvimos preocupaciones pero al final termino todo bien.
- A todos mil gracias y un saludo.

Roi Fernández

AGRADECIMIENTOS

Primero doy gracias a Dios por todas las personas maravillosas que ha puesto a mi lado y por todas las hermosas experiencias que ha dispuesto para mí.

A la Universidad de Oriente, la casa más alta, gracias por proveer las instalaciones y un excelentísimo grupo de profesores que me permitieron iniciar mi desarrollo profesional.

A mi compañero de monografía Roí Fernández por haberme ayudado tanto y tenerme mucha paciencia durante el transcurso de las aéreas.

Gracias a mis padres Gisela y Hogward. Mamá, en tu ejemplo y tu dedicación se inspiran mis logros. Papá, tus consejos oportunos y tu gran personalidad, están esparcidas en todas mis decisiones. Gracias por el amor, la alegría y el orgullo que siento cada vez que los veo.

Gracias también a Simón, mi compañero en la alegría y en las penas, en la riqueza y en la pobreza, en la salud y la enfermedad, durante los semestres de esta carrera. Tu presencia hace aun más especial los momentos especiales de mi vida y entre ellos el regalo de ser madre del terrible “sebas”.

A mis compañeros de estudios y otros compañeros con los que tuve la dicha de compartir esos días de universidad, entre ellos Eileen Tovar, Mary Ross González, Jaigimar Zapata Julio Palacios, Andrés Orozco, Andreina Palomo, Alexandra Torres, Carlos Chacón, Geovanny Rocca, Karol Guzmán entre otros, que no recuerdo y que no puedo ponerlos a todos.

Francis Payares

RESUMEN

El objetivo de este trabajo es el diseño de una caldera de recuperación de calor(caldera de vapor). Se recopiló información referente al proceso con el cual opera y las partes las cuales conforman a la caldera diseñada. Se elaboró una serie de cálculos teniendo como valores iniciales el caudal de operación 1433,25 lb/h, temperatura y presiones de entrada y salida de la caldera de los cuales son claves para determinar los parámetros característicos de la caldera, como la potencia de operación que dio como resultado 40hp, potencia de diseño 50hp, rendimiento de la caldera, calor generado y necesario para la generación de vapor y otros parámetros necesarios para los cálculos, también se realizó el dimensionamiento de la caldera, tubos, hogar, etc, también se hizo los cálculos de la potencia de la bomba de agua para alimentar a la caldera y tanque donde se encuentra almacenada. Posteriormente se realizó una hoja de cálculo por Excel la cual además de facilitar los cálculos es de gran uso para obtener los parámetros necesarios de forma sencilla y rápida, teniendo valores que son constantes para el diseño.

TABLA DE CONTENIDO

RESOLUCIÓN.....	iv
DEDICATORIA.....	v
AGRADECIMIENTOS	vii
RESUMEN	ix
TABLA DE CONTENIDO	x
CAPITULO I	1
INTRODUCCIÓN	1
1.1 Introducción	1
1.2 Planteamiento del problema	2
1.3 Objetivos de la investigación	3
1.3.1 Objetivo general	3
1.3.2 Objetivos específicos.....	4
CAPÍTULO II	5
MARCO TEÓRICO.....	5
2.1. Antecedentes.....	5
2.2. Bases teóricas	6
2.2.1 Nociones sobre calderas.....	6
2.2.1.1 Tipos de Calderas.....	8
2.2.1.2 Producción de vapor.....	10
2.2.1.3. Agua de alimentación a la caldera.....	12
2.2.1.4. Presiones de la caldera.	13
2.2.1.5. Capacidades de la caldera.	14
2.2.1.6. Selección del suavizador para calderas.	14
2.2.1.7. Determinando el volumen de reposición.....	15

2.2.1.8. Cálculos para seleccionar suavizador de calderas.....	17
2.2.1.9 Partes que conforman una caldera.....	24
2.2.2. Plantas termoeléctricas.....	30
2.2.2.1 Centrales termoeléctricas de ciclo convencional.....	31
2.2.3. Calderas recuperadoras.....	37
2.2.3.1 Simulación de procesos apoyada por computadoras.....	37
2.2.4. Componentes de una caldera de recuperación.....	39
2.2.5. Caldera acuotubular de recuperación.....	41
2.2.6. Caldera pirotubular de recuperación.....	42
2.2.7. Elección del tipo de caldera.....	43
2.2.8. Recuperadores de gases de combustión.....	45
2.2.9. Rocío ácido.....	46
2.2.10. Calor sensible y calor latente.....	47
CAPÍTULO III.....	48
MARCO METODOLOGICO.....	48
3.1. Tipo de investigación.....	48
3.2. Técnicas de recolección de datos.....	48
3.2.1. Observación Directa.....	48
3.2.2. Revisión de Documentos.....	49
3.3. Etapas de la investigación.....	49
CAPÍTULO IV.....	53
DESARROLLO DE LA MONOGRAFIA.....	53
4.1. Descripción del funcionamiento de una planta termoeléctrica y específicamente, el de una caldera recuperadora de calor dentro de la misma	53
4.1.1. Partes constitutivas de la caldera.....	59
4.1.2. Componentes de Seguridad de una caldera.....	60

4.2. Evaluación de los parámetros de diseño necesarios para la propuesta de la ingeniería conceptual y básica de la caldera recuperadora de calor.	61
4.3. Cálculos de diseño, basados en la evaluación de parámetros, que permitan el dimensionamiento y estimación de la capacidad de la caldera recuperadora de calor	63
4.3.1. Estudio de la potencia de la caldera.....	64
4.3.2. Estudio del cuerpo.....	68
4.3.3. Estudio de los tubos.....	69
4.3.3.1. Longitud.....	69
4.3.3.2. Diámetro	70
4.3.4. Estudio del área de calentamiento.....	71
4.3.5. Estudio del número de tubos.....	71
4.3.5.1 Calculo peso total tubos.	72
4.3.5.2 Distribución de los tubos en el espejo.	73
4.3.6. Estudio del diámetro del espejo	75
4.3.7. Estudio del hogar.	75
4.3.8. Estudio del área para acumulación de vapor.	75
4.3.9. Estudio del tanque de agua.....	76
4.3.10. Calculo del combustible necesario para la caldera.	79
4.3.10.1. Calor que necesito para elevar la entalpía del punto 1 al 2:	79
4.3.10.2. Calor que debe dar el combustible:	79
4.3.10.3. Caudal volumétrico del combustible.	80
4.3.11. Estudio del rendimiento de la caldera	81
4.3.12. Estudio de la potencia de la bomba de agua.	81
4.3.13. Estudio del trabajo de la bomba.....	82
4.3.14. Estudio de los esfuerzos de la caldera dimensionada.....	87

4.4. Formulación de una hoja de cálculos, mediante la cual, se estime la capacidad en función de la demanda	96
4.5. Análisis de las fallas que se presentan comúnmente en una caldera recuperadora de calor y en especial en una planta termoeléctrica	99
4.6. Recomendación de la aplicación de un plan de mantenimiento preventivo para el aprovechamiento de la vida útil y operativa de la caldera recuperadora de calor diseñada	104
CONCLUSIONES	110
RECOMENDACIONES.....	111
BIBLIOGRAFÍA	113
METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:	114

CAPITULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 Introducción

Esta investigación presenta el desarrollo de la ingeniería conceptual y básica de una caldera de recuperación de calor a ser colocada en una planta termoeléctrica. La economía de escala ha impuesto un drástico crecimiento del tema de la caldera recuperadora durante los últimos diez años. Hoy en día, la capacidad de una caldera moderna típicamente excede las 3000 tds/día. La energía de entrada, basada en el valor calorífico bruto, ha aumentado hasta 650 MW, lo cual corresponde a flujos de vapor superiores a 150 kg/s. El rol principal de la caldera recuperadora es recuperar componentes químicos para procesarlos, recuperar calor para regenerarlo; es decir, utilizar el contenido calórico de materia orgánica para aumentar la eficiencia de la generación eléctrica, aumentando los parámetros de vapor que influyen en los efectos de temperatura y presión propios del mismo y que mejoran la generación eléctrica y su productividad. A continuación se desarrolla la investigación, describiendo el problema planteado, formulando los objetivos necesarios para lograr el éxito de la misma, mostrando los antecedentes y marco referencial; así como también, el marco metodológico y por supuesto el desarrollo propiamente de la investigación mediante el desglose técnico de los mismos, y finalmente se formulan las conclusiones correspondientes como hipótesis importantes que deben ser analizadas para verificar el cumplimiento de estos objetivos.

1.2 Planteamiento del problema

Las centrales termoeléctricas clásicas o convencionales son aquellas centrales que producen energía eléctrica a partir de la combustión de carbón, fuel-oil o gas en una caldera diseñada al efecto. El apelativo de "clásicas" o "convencionales" sirve para diferenciarlas de otros tipos de centrales termoeléctricas (nucleares y solares, por ejemplo), las cuales generan electricidad a partir de un ciclo termodinámico, pero mediante fuentes energéticas distintas de los combustibles fósiles empleados en la producción de energía eléctrica desde hace décadas y, sobre todo, con tecnologías diferentes y mucho más recientes que las de las centrales termoeléctricas clásicas. Independientemente de cuál sea el combustible fósil que utilicen (fuel-oil, carbón o gas), el esquema de funcionamiento de todas las centrales termoeléctricas clásicas es prácticamente el mismo. Las únicas diferencias consisten en el distinto tratamiento previo que sufre el combustible antes de ser inyectado en la caldera y en el diseño de los quemadores de la misma, que varían según sea el tipo de combustible empleado.

Una central termoeléctrica clásica posee, dentro del propio recinto de la planta, sistemas de almacenamiento del combustible que utiliza (parque de carbón, depósitos de fuel-oil) para asegurar que se dispone permanentemente de una adecuada cantidad de éste. Si se trata de una central termoeléctrica de carbón (hulla, antracita, lignito, etc) es previamente triturado en molinos pulverizadores hasta quedar convertido en un polvo muy fino para facilitar su combustión. Una vez en la caldera, los quemadores provocan la combustión del carbón, fuel-oil o gas, generando energía calorífica. Esta convierte a su vez, en vapor a alta temperatura el agua que circula por una extensa red formada por miles de tubos que tapizan las paredes de la caldera. Este vapor entra a gran

presión en la turbina de la central, la cual consta de tres cuerpos de alta, media y baja presión, respectivamente unidos por un mismo eje. El objetivo de esta triple disposición es aprovechar al máximo la fuerza del vapor, ya que este va perdiendo presión progresivamente, por lo cual los álabes de la turbina se hacen de mayor tamaño cuando se pasa de un cuerpo a otro de la misma. Hay que advertir, por otro lado, que este vapor, antes de entrar en la turbina, ha de ser cuidadosamente deshumidificado. En caso contrario, las pequeñísimas gotas de agua en suspensión que transportaría serían lanzadas a gran velocidad contra los álabes, actuando como si fueran proyectiles y erosionando las paletas hasta dejarlas inservibles.

Se requiere para esta investigación, la generación eléctrica en una extensión territorial de un estado cualquiera del país y se plantea la necesidad o alternativa factible de generación a vapor a través de una turbina, por lo cual se requiere en primer lugar el diseño de una caldera recuperadora de vapor, adecuada para estos casos, como la solución inmediata al problema. En tal sentido se propone, el diseño de la etapa conceptual y básica de una caldera de vapor para la impulsión a vapor de una turbina, con el propósito de a través de un generador eléctrico, transformar la energía térmica en energía eléctrica.

1.3 Objetivos de la investigación

1.3.1 Objetivo general

Proponer la ingeniería conceptual y básica para el diseño de una caldera de recuperación de calor, que será utilizada en la generación, en una planta termoeléctrica, con el propósito de que se tenga un estimado de su capacidad, basada en una demanda de energía formulada.

1.3.2 Objetivos específicos

1. Describir el funcionamiento de una planta termoeléctrica y específicamente, el de una caldera recuperadora de calor dentro de la misma.
2. Evaluar los parámetros de diseño necesarios para la propuesta de la ingeniería conceptual y básica de la caldera recuperadora de calor.
3. Realizar cálculos de diseño, basados en la evaluación de parámetros, que permitan el dimensionamiento y estimación de la capacidad de la caldera recuperadora de calor.
4. Formular una hoja de cálculos, mediante la cual, se estime la capacidad en función de la demanda.
5. Analizar las fallas que se presentan comúnmente en una caldera recuperadora de calor y en especial en una planta termoeléctrica.
6. Recomendar la aplicación de un plan de Mantenimiento preventivo para el aprovechamiento de la vida útil y operativa de la caldera recuperadora de calor diseñada.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes

BORROTO, Aníbal, 2006, en su investigación titulada, **Aumento de la eficiencia térmica en calderas pirotubulares, mediante la eliminación de calor sensible**, estableció que el ahorro de energía y su producción a partir de fuentes alternativas es actualmente la coyuntura en la discusión de economistas, empresarios, investigadores y especialistas en materia de energía por su influencia directa en la disminución de los niveles de contaminación ambiental y la reducción de los costos de producción de la empresa. Presenta semejanzas con esta investigación porque se trata también de una caldera recuperadora de calor, a través de la eliminación de otro tipo de calor remanente.

GONZALEZ, Iriberto, 2003, en una investigación titulada, **Predicción de inquemados en cenizas en calderas de carbón pulverizado. Análisis y evaluación de estrategias de operación**, realizó mejoras operativas y de diseño para a través de residuos de cenizas, recuperar calor y mejorar la eficiencia de los procesos generativos de energía en una planta termoeléctrica.

COLUNGA, Andrés, 2002, realizó una investigación titulada, **Estudio de viabilidad de sustitución de calderas convencionales por una planta solar de tecnología CCP en industria de congelados y estudio de la influencia de la latitud geográfica**, en la cual se intentó el rediseño de una planta de generación termoeléctrica a partir de la implantación de un recolector o acumulador de

ingeniería solar a través de una empresa del ramo alimenticio, siempre manteniendo como premisa la recuperación de calor.

2.2. Bases teóricas

2.2.1 Nociones sobre calderas.

Una caldera es una máquina o dispositivo de ingeniería que está diseñado para generar vapor saturado. Éste vapor se genera a través de una transferencia de calor a presión constante, en la cual el fluido originalmente en estado líquido, se calienta y cambia de estado. Según la ITC-MIE-AP01, caldera es todo aparato a presión en donde el calor procedente de cualquier fuente de energía se transforma en energía utilizable, a través de un medio de transporte en fase líquida o vapor.

Las calderas son un caso particular en el que se eleva a altas temperaturas de intercambiadores de calor, en las cuales se produce un cambio de fase. Además son recipientes a presión, por lo cual son construidas en parte con acero laminado a semejanza de muchos contenedores de gas. Debido a las amplias aplicaciones que tiene el vapor, principalmente de agua, las calderas son muy utilizadas en la industria para generarlo, para aplicaciones como:

- Esterilización (tindarización): es común encontrar calderas en los hospitales, las cuales generan vapor para esterilizar los instrumentos médicos, también en los comedores con capacidad industrial se genera vapor para esterilizar los cubiertos, así como para la elaboración de alimentos en marmitas.

- Calentar otros fluidos, por ejemplo, en la industria petrolera se calientan los petróleos pesados para mejorar su fluidez y el vapor es muy utilizado.
- Generar electricidad a través de un ciclo Rankine. Las calderas son parte fundamental de las centrales termoeléctricas.

Es común la confusión entre caldera y generador de vapor, pero su diferencia es que el segundo genera vapor sobrecalentado, tal como se ve en la figura 2.1.



Figura 2.1. Caldera de vapor.

Cuando James Watt observó que se podría utilizar el vapor como una fuerza económica que reemplazaría la fuerza animal y manual, se empezó a desarrollar la fabricación de calderas, hasta llegar a las que actualmente tienen mayor uso en las distintas industrias. Las primeras calderas tenían el inconveniente de que los gases calientes estaban en contacto solamente con su base, y en consecuencia se aprovechaba mal el calor del combustible. Debido a esto, posteriormente se le introdujeron tubos para aumentar la superficie de calefacción. Si por el interior de los tubos circulan gases o fuego, se les clasifican en calderas pirotubulares (tubos de humo) y calderas acuotubulares (tubos de agua).

2.2.1.1 Tipos de Calderas.

- **Acuotubulares:** son aquellas calderas en las que el fluido de trabajo se desplaza a través de tubos durante su calentamiento. Son las más utilizadas en las centrales termoeléctricas, ya que permiten altas presiones a su salida y tienen gran capacidad de generación.
- **Pirotubulares:** en este tipo el fluido en estado líquido se encuentra en un recipiente y es atravesado por tubos, por los cuales circulan gases a alta temperatura, producto de un proceso de combustión. El agua se evapora al contacto con los tubos calientes producidos a la circulación de los gases de escape.

Elementos y términos relacionados con calderas:

- Agua de alimentación: Es el agua de entrada que alimenta el sistema, generalmente agua de pozo o agua de red con algún tratamiento químico como la desmineralización.

- Agua de condensado: Es el agua que proviene del estanque condensador y que representa la calidad del vapor.
- Vapor seco o sobresaturado: Vapor de óptimas condiciones.
- Vapor húmedo o saturado: Vapor con arrastre de espuma proveniente de un agua de alcalinidad elevada.
- Condensador: Sistema que permite condensar el vapor.
- Estanque de acumulación: Es el estanque de acumulación y distribución de vapor.
- Des-aireador: Es el sistema que expulsa los gases a la atmósfera.
- Purga de fondo: Evacuación de lodos y concentrado del fondo de la caldera.
- Purga de superficie: Evacuación de sólidos disueltos desde el nivel de agua de la caldera.
- Fogón u hogar: Alma de combustión del sistema.
- Combustible: Material que produce energía calórica al quemarse.
- Agua de calderas: Agua de circuito interior de la caldera cuyas características dependen de los ciclos y del agua de entrada.
- Ciclos de concentración: Número de veces que se concentra el agua de caldera respecto del agua de alimentación.
- Alcalinidad: Nivel de salinidad expresada en ppm de CaCO_3 que confiere una concentración de iones carbonatos e hidróxilos que determina el valor de pH de funcionamiento de una caldera, generalmente desde 10,5 a 11,5.
- Desoxigenación: Tratamiento químico que elimina el oxígeno del agua de calderas.
- Incrustación: Sedimentación de sólidos con formación de núcleos cristalinos o amorfos de sulfatos, carbonatos o silicatos de magnesio que merman la eficiencia de funcionamiento de la caldera.

- Dispersante: Sistema químico que mantiene los sólidos des-cohesionados ante un evento de incrustación.
- Anti-incrustante: Sistema químico que permite permanecer a los sólidos incrustantes en solución.
- Anti-corrosivo: Sistema químico que brinda protección por formación de films protectivos ante iones corrosivos presentes en el agua.
- Índice de vapor/combustible: Índice de eficiencia de producción de vapor de la caldera.

2.2.1.2 Producción de vapor.

La mayoría de las calderas tienen varias cosas en común. Usualmente, en la parte inferior está un fogón o cámara de combustión (horno) a donde se alimenta el combustible más barato o más disponible a través de un quemador para formar una flama. El quemador está controlado automáticamente para pasar sólo el combustible suficiente para mantener una presión de vapor deseada. La flama o calor es dirigida y distribuida a las superficies de calentamiento, las cuales usualmente son tubos, tiros de chimenea o serpentines de diámetro bastante pequeño.

En algunos diseños el agua fluye a través de los tubos o serpentines y el calor es aplicado al exterior. A éstas se les denominan calderas acuotubulares. En otras calderas los tubos o tiros de chimenea están inmersos en el agua y el calor pasa a través del interior de los tubos. Estas son calderas humotubulares. Si el agua es sometida a los gases calentados más de una vez, la caldera es de "dos-pasos", de "tres-pasos", o de "pasos múltiples".

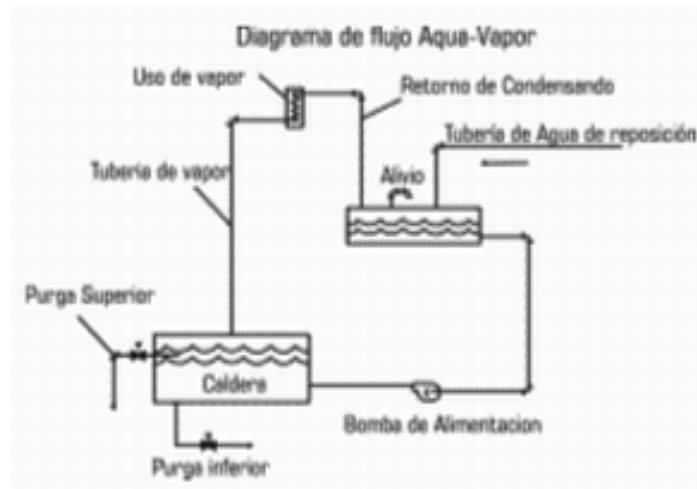


Figura 2.2. Diagrama de flujo de agua-vapor.

El agua calentada o vapor se eleva hasta la superficie del agua, vaporiza y es recolectada en una o más cámaras o "tambores". Mientras más grande la capacidad del tambor, mayor es la capacidad de la caldera para producir grandes y repentinas demandas de vapor. En la parte superior del tambor de vapor está una salida o "cabezal de vapor" desde la cual el vapor es entubado hasta los puntos de uso. En la parte superior del fogón está una chimenea de metal o de ladrillo o "inductor de tiro", el cual se lleva los subproductos de la combustión y las variables cantidades de combustible no utilizado. En la parte inferior de la caldera, y usualmente al lado opuesto del fogón, está una válvula de salida denominada como "purga". Es a través de esta válvula que la mayor parte del polvo, lodo, cieno y otros materiales indeseables son purgados de la caldera. Adheridos a la caldera hay múltiples controles de seguridad para liberar la presión, si ésta se eleva demasiado, para apagar el quemador si el agua baja demasiado o para controlar automáticamente el nivel del agua. Se incluye una columna de agua (vidrio de nivel) para que el nivel interior del agua quede visible para el operador.

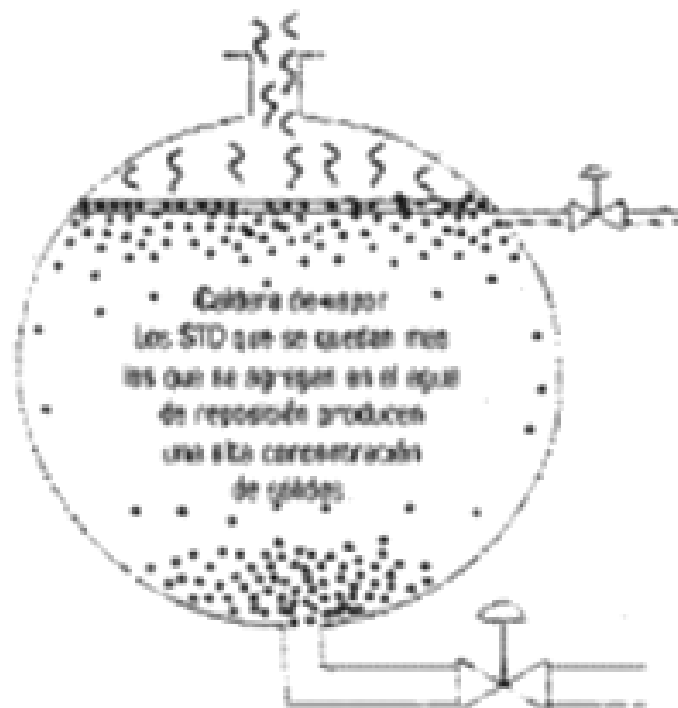


Figura 2.3. Diagrama de nivel en una caldera.

2.2.1.3. Agua de alimentación a la caldera.

El agua para la caldera se almacena usualmente en un tanque "de relleno o reposición" de manera que se tenga disponible un volumen de agua suficiente para demandas mayores a las acostumbradas. Se mantiene un nivel constante por medio de una válvula flotadora similar en principio al flotador en el tanque de un sanitario. Una bomba de alta presión saca el agua del tanque de relleno y la vacía en la caldera. Debido a que la mayoría de las calderas operan a presiones más altas que las del suministro de agua, la bomba debe elevar la presión del agua de alimentación un poco por encima de la presión de operación de la caldera. El vapor limpio en forma de gas cuando se enfría y se condensa es agua pura y se le

denomina "condensado". A medida que se condensa el agua contiene considerable calor, el cual puede ser utilizado. Es un agua de relleno o de alimentación casi perfecta, ya que ha sido despojada de minerales disueltos y materia extraña en el proceso de evaporación. Siempre que es posible, el condensado es regresado a la caldera y recolectado en un tanque denominado "receptor o tanque de condensado". Cuando se recupera el condensado, el receptor puede también desempeñar la función de tanque de relleno.

En algunas instalaciones, el retorno del condensado puede suministrar tanto como el 99% del agua de alimentación y mientras más alto sea el porcentaje de condensado, se requiere menos tratamiento de agua. Otras instalaciones pueden requerir del 100% de reposición si por alguna razón el condensado no puede ser recuperado o si está muy contaminado.

2.2.1.4. Presiones de la caldera.

La temperatura y la presión a las cuales opera una caldera tienen una relación definida, según se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 2.1. Punto de ebullición del agua a diferentes presiones.

TEMPERATURA		PRESIÓN	
°F	°C	Kg/cm ²	PSI
212	100	0	0
300	149	3.7	52
400	204	16	232
500	260	47	666
600	316	108	1529
700	371	217	3080
705	374	225	3200

A presión atmosférica normal, el agua hierve a 100 °C (212 °F); a presiones más altas se incrementa el punto de ebullición, alcanzando un máximo de 374°C (705°F) a una presión de 225 kg/cm² (3200 psi). Arriba de esta temperatura el agua no puede existir como un líquido.

2.2.1.5. Capacidades de la caldera.

Las calderas son clasificadas por la cantidad de vapor que pueden producir en un cierto período de tiempo a una cierta temperatura. Las unidades más grandes producen 454,545 kg (1,000,000 lb) de vapor por hora. Las calderas se clasifican a 1 HP (0.745 kilowatts) de fuerza por cada 15.7 kg (34.5 lb) de agua que pueda evaporar por hora. Otra definición es 1 HP (0.745 kilowatts) por cada 0.93 m² (10 pie²) de superficie de calentamiento en una caldera acuotubular o 1.11 m² (12 pie²) de superficie de calentamiento en una caldera humotubular.

Equivalencias:

- 1 HP (0.745 kilowatts) hr de caldera = 15 lt. (4 gal.) de agua evaporada por hora.
- 1 kg (2.2 lb) de evaporación por hora = 1 lt. (0.26 gal) evaporado por hora.
- 1 galón de evaporación por hora = 8.34 lbs de agua por hora.
- 1 HP de caldera = 15 kg (33.36 lb) de agua por hora.

2.2.1.6. Selección del suavizador para calderas.

En el proceso de seleccionar un adecuado suavizador del agua para el tratamiento de agua de alimentación de una caldera deben revisarse varias áreas. Esto implica básicamente la necesidad de obtener un análisis del agua, los HP de

la caldera y la información referente a la recuperación del vapor. Cada una de estas áreas deberá revisarse previo al proceso de selección de un suavizador. La dureza se compone de calcio y magnesio. La dureza en las aguas naturales variará considerablemente, dependiendo de la fuente de donde se obtenga el agua. Las secciones del país que tienen formaciones de piedra caliza generalmente tienen un alto contenido de dureza en el agua. Dado que las aguas superficiales son diluidas por las lluvias, el agua de pozo en la misma área normalmente tendrá una dureza mucho más alta que la del agua superficial, dado que el flujo es subterráneo sobre capas de rocas.

Nunca debe suponerse el grado de dureza en una ubicación dada. Deben hacerse todos los esfuerzos posibles para obtener un análisis del agua en el sitio de la instalación, esto garantizará la precisión en el proceso de selección.

Para poder determinar el tamaño de un suavizador de agua el primer procedimiento en el proceso de selección es determinar la cantidad de dureza. Muchos de los reportes de análisis de agua expresan la dureza total en partes por millón (PPM). La expresión PPM debe ser convertida, si se usa sistema inglés, a granos por galón (GPG) para poder seleccionar el tamaño de un sistema suavizador. Para convertir la dureza expresada en PPM a GPG, divide PPM entre 17.1. Ejemplo: Un reporte de dureza total de 400 PPM se convierte como sigue: $400 \text{ PPM} \div 17.1 = 23 \text{ GPG}$ de dureza.

2.2.1.7. Determinando el volumen de reposición.

Para poder determinar la cantidad de agua utilizada para alimentar a una caldera, se necesita hacer cálculos para convertir la capacidad de la caldera a la

cantidad máxima de agua de reposición en litros (galones). Las capacidades de la caldera se dan en varias formas, sin embargo todas pueden y deben ser convertidas a un factor común de caballos de fuerza. Por cada caballo de fuerza (0.745 kilowatts) se requiere un volumen de agua de alimentación de 16 lt (4.25 gal.) por hora. Para convertir otras capacidades de la caldera a caballos de fuerza debe consultarse la siguiente tabla.

Tabla 2.2. Datos sobre calderas:

CAPACIDADES DE LA CALDERA	FACTORES UTILIZADOS PARA CONVERTIR A CABS.DE FZA. (HP)
Kg (o Libras) de vapor por hora	Dividir entre 15.7 (para libras dividir entre 34.5)
BTU's	Dividir entre 33.475
Metros ² (Pies ²) del área – acuotubulares	Dividir entre 0.93 (para pies ² dividir entre 10)
Metros ² (Pies ²) del área – humotubulares	Dividir entre 1.11 (para pies ² dividir entre 12)

Para determinar los caballos de fuerza de la caldera deben conocerse dos factores adicionales para poder obtener la cantidad neta de agua de relleno requerida en un período de 24 horas. El primero de éstos es determinar la cantidad de retorno de condensado a la caldera, la cantidad del condensado regresado a un sistema de caldera es información vital para seleccionar un suavizador de agua. Esta información normalmente la conoce el operador de la caldera o el ingeniero de diseño. La cantidad del condensado regresado se resta de la cantidad máxima del volumen de agua de relleno calculado de la capacidad en caballos de fuerza. La cantidad neta a la que se hace referencia es la diferencia entre la máxima agua de relleno menos la cantidad de condensado regresado al sistema. Un método muy preciso para determinar la cantidad neta del agua de relleno por hora o el porcentaje de condensado regresado puede ser calculando simplemente de las operaciones existentes, comparando un análisis del agua del

tanque receptor del condensado y el agua cruda de relleno. Al comparar estas dos aguas, uno puede ser muy preciso en la cantidad de condensado regresado al sistema.

Ejemplo: Un tanque receptor de condensado con un agua que contenga 300 PPM de sólidos disueltos totales (SDT) y un factor conocido de 600 PPM de SDT en el suministro de agua cruda de relleno nos indicaría un retorno de condensado del 50%. Según se describió antes en esta publicación, el condensado es agua casi perfecta (cero SDT) cuando entra al tanque receptor del condensado. Por lo tanto, cuando el suministro de agua cruda de 600 PPM de SDT es diluida con agua con 0 PPM de SDT en relación 1:1, el resultado sería 300 PPM de SDT o una dilución del 50% o un retorno de condensado del 50%. El paso final en nuestra recolección de información para el proceso de selección del suavizador es obtener el número de horas que la caldera es operada en un día. Esto no es importante sólo para poder determinar el volumen total de agua de relleno, también es información requerida para determinar el diseño de nuestro sistema suavizador. Una caldera que opera 24 horas al día requerirá agua suave en todo momento. Por lo tanto, el diseño requerirá el uso de dos unidades. En los sistemas que operan 16 horas al día, el uso de un solo suavizador llenará las necesidades de la operación. Típicamente, el tiempo requerido para regenerar un suavizador es menos de tres horas.

2.2.1.8. Cálculos para seleccionar suavizador de calderas.

Ahora estamos listos para proceder con un enfoque típico para seleccionar un suavizador de agua. Primero se reúne la información acerca de todos los aspectos del sistema de caldera discutidos en esta sección. Primero habrá que

hacer un listado de todos los factores de nuestro diseño. La siguiente representa una planta de caldera típica de la cual podemos calcular la demanda para un suavizador.

(1) Determinar la dureza del agua.

El análisis recibido o tomado está en partes por millón (PPM) o mg/l. Si se usa sistema inglés convertir a granos por galón (GPG).

$$400 \text{ ppm} \div 17.1 = 23 \text{ GPG}$$

(2) Determinar los Hp de la caldera.

La capacidad de la caldera es en kg (libras) por hora de vapor. Convertir a HPs.

$$784 \text{ kg (1,725 lbs) por hora} \div 15.7 (34.5) = 50 \text{ HP}$$

(3) Determinar el máximo de litros (galones) por hora de agua de relleno.

La capacidad de la caldera es de 50 HP. Convertir los HP a litros (o galones) por hora de agua de relleno.

$$50 \text{ HP} \times 16 \text{ lt (4.25 gal.) por hora de relleno.}$$

(4) Determinar la cantidad de condensado regresado al sistema y calcular el requerimiento neto de agua de relleno.

El relleno por hora es de 800 litros (211 galones). El condensado regresado es del 50% o 400 litros (105.5 galones) por hora.

$$800 - 400 = 400 \text{ litros (211 - 105.5 = 105.5 galones) de relleno netos por hora.}$$

(5) Determinar los requerimientos totales diarios de relleno.

400 litros (105.5 galones) de relleno netos por hora. El sistema de caldera opera 16 horas al día. 400 litros (105.5 galones) por hora x 16 horas = 6,400 litros (1,688 galones) por cada día de operación.

(6) Determinar los gramos como CaCo3 (o granos) de dureza totales que deberán ser removidos diariamente.

6,400 litros (1,688 galones) por día con una dureza de 400 ppm o 400 mg/l o 0.4 g/l (23 granos por galón).

6,400 litros x 0.4 g/lit = 2,560 g (1,688 galones x 23 GPG = 38,824 granos) de dureza seca necesitan ser removidos del agua cada día.

La respuesta en nuestro sexto paso de 2,560 gramos (38,824 granos) de dureza seca para ser removidos del agua diariamente, nos lleva a nuestro enfoque final al seleccionar un suavizador de agua. Debido a la naturaleza de la importancia de obtener agua suave para el agua de alimentación de la caldera, debemos dejar un margen de error en nuestro proceso de selección. Comúnmente, este margen es del 15%. La multiplicación de 2,560 gramos (38,824 granos) por día x 1.15 da por resultado una demanda total de remoción de 2,944 gramos (44,648 granos) por día que necesitan ser removidos.

2.2.1.8.1 Selección de suavizadores residenciales y comerciales.

Utilizar esta tabla para determinar el modelo y tamaño del suavizador para una determinada dureza y un determinado número de personas en la casa o edificio, lo establecido requerido para el ciclo de regeneración y lo establecido (en litros o galones) para el medidor opcional. Ver las notas al pie de la tabla para las claves para leer la tabla.

Tabla 2.3. Número de personas utilizando agua suavizada en la casa (consumo en m³ y gal).

Dureza ppm CaCO ₃ (granos por galón)	1 2.3 m ³ 75gal	2 0.28 m ³ 150gal	3 0.57 m ³ 225gal	4 0.85 m ³ 300gal	5 1.14 m ³ 375gal	6 1.4 m ³ 450gal	7 1.7 m ³ 525gal	8 2 m ³ 600gal
17.1-86 (1-5)	989 15 12 1700	989 15 12 1600	989 15 6 1500	989 15 6 1500	989 15 4 1400	1978 30 6 3500	1978 30 4 3400	1978 30 3 3300
103-170 (6-10)	989 15 12 800	989 15 4 750	989 15 3 650	1978 30 4 1500	1978 30 4 1400	1978 30 3 1300	1978 30 3 1200	2967 45 4 2100
188-256 (11-15)	989 15 6 500	989 15 3 400	1978 30 4 950	1978 30 3 900	1978 30 3 800	2967 45 3 1300	2967 45 3 1200	2967 45 2 1100
274-340 (16-20)	989 15 4 375	989 15 2 300	1978 30 3 675	2967 45 4 1100	2967 45 3 1000	2967 45 3 900	3956 60 3 1200	3956 60 2 1100
359-428 (21-25)	989 15 4 250	1978 30 4 600	1978 30 3 500	2967 45 3 800	2967 45 2 700	3956 60 3 1000	3956 60 2 900	5934 90 3 1600
445-513 (24-30)	1978 30 6 450	1978 30 3 400	2967 45 3 550	2967 45 2 500	3956 60 2 700	5934 90 3 1200	5934 90 3 1600	7912 120 3 1500
530-599 (31-35)	1978 30 4 400	1978 30 3 350	2967 45 3 550	3956 60 3 700	5934 90 4 1200	5934 90 3 1100	7912 120 3 1500	7912 120 3 1400
616-684 (36-40)	1978 30 4 400	2967 45 4 525	2967 45 2 450	3956 60 2 600	5934 90 3 975	5934 90 3 1350	7912 120 3 1200	- - - -
701-770 (41-45)	2967 45 6 500	2967 45 3 400	3956 60 3 500	5934 90 3 900	5934 90 3 800	7912 120 3 1000	- - - -	- - - -
787-855 (46-50)	2967 45 6 500	3956 60 4 600	5934 90 4 950	5934 90 3 850	7912 120 3 1100	- - - -	- - - -	- - - -

Lo establecido para el medidor está basado en las capacidades del suavizador al mínimo de salmuera: 96 g por litro de resina (6 lbs/pe3 de resina).

Clave Para Cada Segmento Horizontal De La Tabla:

Primer renglón = capacidad del suavizador en gramos de dureza como CaCO₃.

Segundo renglón= capacidad del suavizador en kilogramos de dureza

Tercer renglón = número de DÍAS entre los ciclos de regeneración (cuando se instala un timer).

Cuarto renglón = lo establecido para el medidor (en GALONES utilizados entre regeneraciones, para LITROS multiplicar x 3.785) cuando se instala un medidor opcional.

Dureza Compensada: Al seleccionar el equipo de acondicionamiento de agua, la dureza debe basarse en la dureza compensada. La dureza compensada toma en consideración los minerales y otros factores que reducen la capacidad de suavizado de un suavizador. Estas partidas no pueden sacarse de una prueba de dureza estándar. Para llegar a la dureza compensada, multiplicar la cifra de la derecha por la dureza en ppm (mg/l) como CaCO₃ o granos por galón.

Tabla 2.4. Durezas del agua de calderas.

PRUEBA ESTÁNDAR DE DUREZA ppm (granos/gal)	MULTIPLICAR POR	DUREZA COMPENSADA
17.1-342 (1 - 20)	1.1	=
359-684 (21 -40)	1.2	=
701-1197 (41- 70)	1.3	=
1214-1710 (71-100)	1.4	=
1727 (101) - Más	1.5	=

2.2.1.8.2 Metodología para selección de suavizadores.

Se utiliza la siguiente fórmula para determinar la cantidad de resina y el tamaño del tanque:

$$\text{Vol.Res. (pie}^3\text{)} = (\text{gasto o flujo en gpm}) / (5 \text{ gpm/pie}^3 \text{ de resina}).$$

Ejemplo: si tenemos un flujo pico a usar de 10 gpm; entonces, Vol.Res. = 10 gpm / 5 gpm/pie³ resina = 2 pies³.

Nota: el flujo mínimo de servicio para un suavizador es de 3 gpm/pie² de área del tanque. Esto para evitar la canalización del flujo a través de la resina.

Se usa esta tabla para determinar el tamaño del tanque:

Tabla 2.5. Dimensionamiento de tanques de agua suavizada.

0.75 pie³	– 8" x 44"
1.0 pie³	– 9" x 48"
1.5 pie³	– 10" x 54"
2.0 pie³	– 12" x 52"
2.5 pie³	– 13" x 54"
3.0 pie³	– 14" x 65"
4.0 pie³	– 16" x 65"
5.0 pie³	– 18" x 65"
7.0 pie³	– 21" x 62"
10.0 pie³	– 24" x 65"
15.0 pie³	– 30" x 72"
20.0 pie³	– 36" x 72"
30.0 pie³	– 42" x 72"
40.0 pie³	– 48" x 72"

Entonces, en el ejemplo anterior escogeríamos el tanque 12" x 52".

Las calderas en sus vertientes de vapor y agua caliente, están ampliamente extendidas tanto para uso industrial como no industrial, encontrándose en cometidos tales como, generación de electricidad, procesos químicos, calefacción, agua caliente sanitaria, etc. Estos ejemplos muestran la complejidad que puede tener una caldera y que haría muy extenso la descripción de los elementos que se integran en ellas. Por ello, para el lector interesado en el conocimiento, no ya de sus elementos, si no del léxico empleado en calderas, le remitimos a la Norma UNE 9001, donde encontrara una terminología suficientemente amplia.

2.2.1.9 Partes que conforman una caldera.

- **Alimentadores.**

Casi cualquier carbón mineral puede quemarse con éxito en algún tipo de alimentador. Además, los materiales de desecho y subproductos, como el coque desmenuzado, los desechos de madera, la corteza, los residuos agrícolas como el bagazo y los desechos municipales que pueden quemarse como combustible básico o como auxiliar. El área requerida para la parrilla, para un tipo y una capacidad dados de su alimentador, se determina por la rapidez máxima permisible de quemado por pie cuadrado, establecida por experiencia. El límite práctico de salida de vapor, en calderas con alimentación mecánica del combustible es cerca de 400 000 lb/h.

- **Pulverizadores.**

La combustión de carbón pulverizado rara vez se aplica en calderas de menos de 100 000 lb de vapor por hora, ya que el uso de los alimentadores es más económico para esas capacidades. En la mayor parte de las instalaciones se aplica el sistema de inyección directa, en el que el carbón y el aire pasan directamente de los pulverizadores a los quemadores, y la rapidez deseada de combustión se regula por la rapidez de pulverización. Algunos tipos de pulverizadores de inyección directa tienen la capacidad para moler 100 toneladas por hora. El pulverizador proporciona la mezcla activa necesaria para secar el porcentaje de materia volátil en el combustible tiene la relación directa con la temperatura recomendada del aire primario para la combustión.

- **Quemadores.**

El propósito principal de un quemador es mezclar y dirigir el flujo de combustible y aire de tal manera que se asegure el encendido rápido y la combustión completa. En los quemadores de carbón pulverizado, una parte del 15 al 25% del aire, llamada aire primario, se mezcla inicialmente con el combustible para obtener un encendido rápido y actuar como un medio de transporte del combustible. La porción restante o aire secundario se introduce a través de registros en la caja de viento. El quemador de tipo circular está diseñado para quemar carbón mineral y puede equiparse para quemar cualquier combinación de los tres combustibles principales, si se toman las precauciones adecuadas para evitar la formación de coque en el elemento carbón, si se está quemando combustóleo (fuel-oil) y carbón mineral.

- **Hogares.**

Un hogar es una cámara donde se efectúa la combustión. La cámara confina el producto de la combustión y puede resistir las altas temperaturas que se presentan y las presiones que se utilizan. Sus dimensiones y geometría se adaptan a la velocidad de liberación del calor, el tipo de combustible y al método de combustión, de tal manera que se haga lo posible por tener una combustión completa y se proporcione un medio apropiado para eliminar la ceniza. Los hogares enfriados por agua se utilizan con la mayor parte de unidades de calderas, es decir en su gran mayoría, y para todos los tipos de combustible y métodos de combustión. El enfriamiento por agua de las paredes del hogar reduce la transferencia de calor hacia los elementos estructurales y en consecuencia, puede limitarse su temperatura a la que satisfaga los requisitos de resistencia

mecánica y resistencia a la oxidación. Las construcciones de tubos enfriados por agua facilitan el logro de grandes dimensiones del hogar y optimas de techos, tolvas, arcos y montajes de los quemadores, así como el uso de pantallas tubulares, planchas o paredes divisoras, para aumentar la superficie absorbente del calor en la zona de combustión. El uso de hogares con enfriamiento por agua reduce las pérdidas de calor al exterior. Las superficies absorbentes del calor en el hogar, lo reciben de los productos de combustión, en consecuencia, contribuyen directamente a la generación de vapor bajando al mismo tiempo la temperatura de los gases que salen del mismo. Los principales mecanismos de transferencia de calor se efectúan en forma simultánea. Estos mecanismos incluyen la radiación entre sólidos que proviene del lecho de combustible o de las partículas de combustible, la radiación no luminosa de los productos de la combustión, la transferencia de calor por convección de los gases del hogar y la conducción de calor a través de los materiales metálicos de los depósitos y tubos. La eficacia de la absorción de las superficies del hogar es influida por los depósitos de ceniza o escoria.

Los hornos difieren en tamaño y forma, en la localización y esparcimiento de los quemadores, en la disposición de la superficie absorbente del calor y de la distribución de los arcos y tolvas. La forma de la llama y su longitud afectan la geometría de la radiación, la velocidad y distribución de absorción del calor por las superficies enfriadas por agua. Las soluciones analíticas de la transferencia de calor en los hogares de las unidades generadoras de vapor son extremadamente complejas, y es muy difícil calcular la temperatura de los gases a la salida del hogar por métodos teóricos. Sin embargo, se debe predecir la temperatura de estos gases en forma precisa, ya que esta temperatura determina el diseño del resto de la unidad de la caldera, en particular el del sobre calentador y del

recalentador. Los cálculos deben de basarse en resultados obtenidos en pruebas, complementados por datos acumulados por la experiencia en operación y juicios, basándose en el conocimiento de los principios de la transferencia de calor y de las características de los combustibles y escorias. Este método se suma a los sistemas aventadores de hollín.

- **Sistemas aventadores de hollín.**

Aun cuando la escorificación y la incrustación de las calderas que queman carbón mineral y combustóleo (fuel-oil) puedan minimizarse mediante el diseño y la operación apropiados, debe suministrarse equipo auxiliar para limpiar las paredes del hogar y eliminar los depósitos de las superficies de convección, para mantener la capacidad y la eficiencia. Chorros de vapor de agua y de aire lanzados por las toberas de los aventadores de hollín desalojan la ceniza seca o sintetizada y la escoria, las que entonces caen en tolvas o se van junto con los productos gaseosos de la combustión al equipo de eliminación. Los tipos aventadores de hollín varían en relación con su ubicación en la unidad de la caldera, la severidad de la ceniza o las condiciones de la escoria, y la disposición de las superficies que absorben calor.

- **Ceniza.**

Las calderas que queman carbón mineral pulverizado pueden diseñarse para que funcionen con ceniza seca o con bigotera. Las de tipo de ceniza seca son apropiadas en particular para aquellos carbones con temperaturas altas de fusión, la ceniza que choca con las paredes enfriadas por agua del hogar pueden extraerse con facilidad. El hogar con bigotera utiliza carbones que tienen

temperaturas bajas de fusión de sus cenizas y se diseña para que tenga temperaturas elevadas cerca del piso, con lo que se logra que la ceniza se funda y pueda sangrarse, es decir que tenga una caída natural. La ceniza al sintetizarse o fundirse, forma depósitos sobre las paredes del hogar, superficies de la caldera y en los tubos del sobre calentador, lo que reduce la absorción de calor, aumenta la pérdida de tiro y posiblemente provoca el sobrecalentamiento de los tubos. Pueden ocurrir dos tipos generales de acumulación de escoria sobre las paredes del hogar y superficies de convección.

Se produce escorificación cuando partículas de ceniza fundidas, o parcialmente fundidas, arrastradas en el gas chocan contra una pared o en la superficie de un tubo, se enfrían y se solidifican. Se tiene la incrustación, cuando los constituyentes volátiles de la ceniza se condensan sobre partículas de ceniza muy fina, sobre los tubos de convección y sobre los depósitos existentes de ceniza se condensan sobre partículas de ceniza muy fina, sobre los tubos de convección y sobre los depósitos existentes de ceniza, a temperaturas en las que estos constituyentes volátiles se mantienen líquidos y se les permite reaccionar químicamente para formar depósitos ligados.

Una solución para evitar estos problemas, es el uso de aditivos como la domita, la cal, y la magnesia, son eficaces en la reducción de la resistencia sintetizada de la ceniza. La domita también es eficaz para neutralizar el ácido en el gas de la combustión y eliminar la condensación y la obstrucción subsiguiente en el extremo frío de los pre-calentadores.

Se han desarrollado muchas calderas para satisfacer necesidades especiales, además de las calderas para convertir la energía contenida en los

combustibles convencionales carbón, combustóleo (fuel-oil) y gas; en vapor para obtener potencia, calefacción o utilizarlo en procesos. El uso de hogares es indispensable en las calderas, ya que de esta manera pueden absorber el calor generado en los quemadores y así cumplen una doble función; la primera es enfriar el quemador y tener mejores propiedades mecánicas y su segunda función es aprovechar este calor, pasando los tubos de agua que posteriormente entrarán a la caldera. En la figura 2.4, se muestra un esquema de los componentes de una caldera.

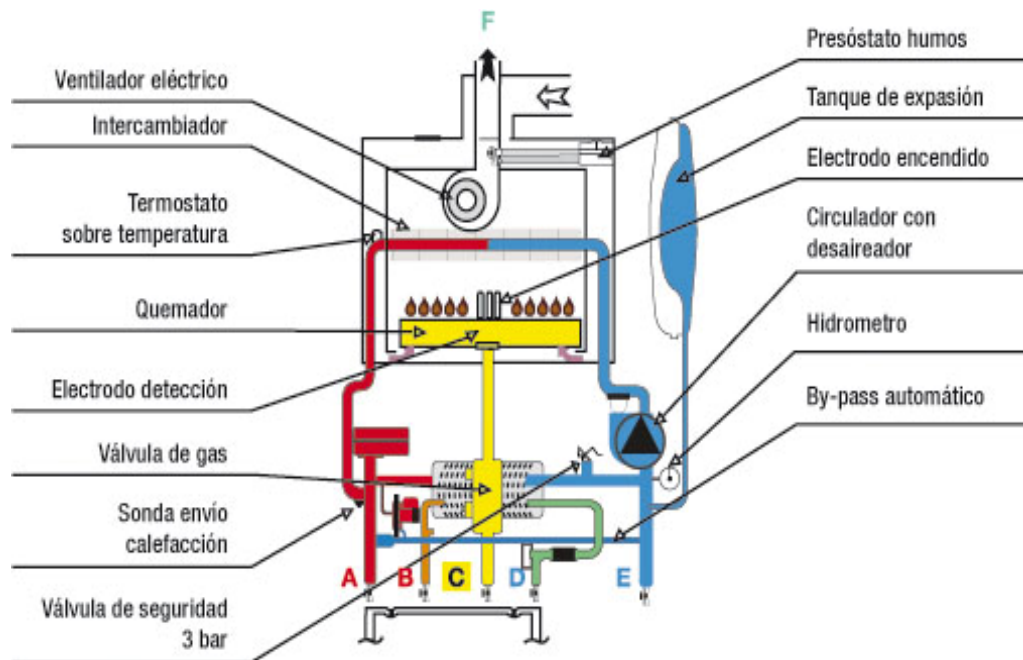


Figura 2.4. Esquema de partes e una caldera.

2.2.2. Plantas termoeléctricas.

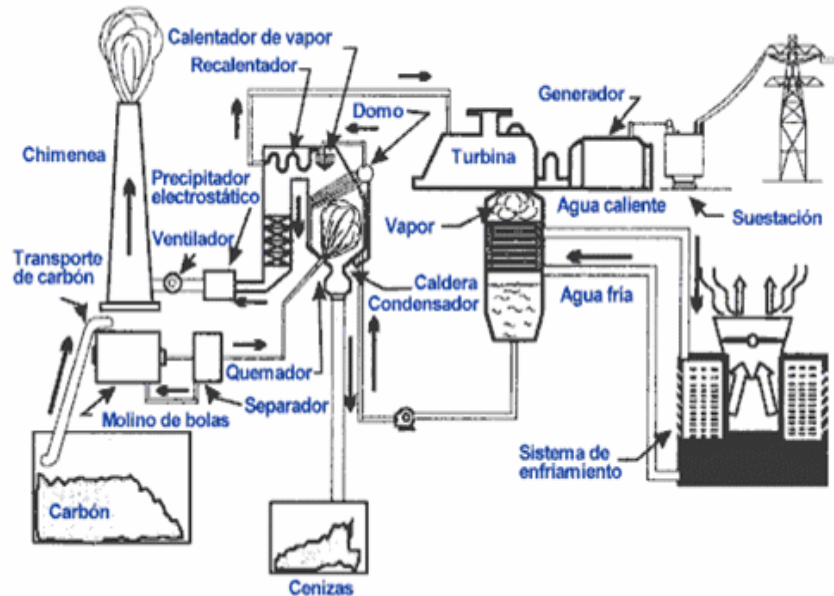


Figura 2.5. Central termoeléctrica.

En la figura anterior (2.5), se muestra un esquema ilustrativo de los componentes funcionales de una planta termoeléctrica.

Una central termoeléctrica o central térmica es una instalación empleada para la generación de energía eléctrica a partir de la energía liberada en forma de calor, normalmente mediante la combustión de combustibles fósiles como petróleo, gas natural o carbón. Este calor es empleado por un ciclo termodinámico convencional para mover un alternador y producir energía eléctrica. Es contaminante pues libera dióxido de carbono. Por otro lado, también existen centrales termoeléctricas que emplean fisión nuclear del uranio para producir electricidad. Este tipo de instalación recibe el nombre de central nuclear y como no libera dióxido de carbono, no favorece el cambio climático.

2.2.2.1 Centrales termoeléctricas de ciclo convencional.

Se llaman centrales clásicas o de ciclo convencional a aquellas centrales térmicas que emplean la combustión del carbón, petróleo (aceite) o gas natural para generar la energía eléctrica. Son consideradas las centrales más económicas y rentables, por lo que su utilización está muy extendida en el mundo económicamente avanzado y en el mundo en vías de desarrollo, a pesar de que estén siendo criticadas debido a su elevado impacto medioambiental.

A continuación se muestra el diagrama de funcionamiento de una central térmica de carbón de ciclo convencional:

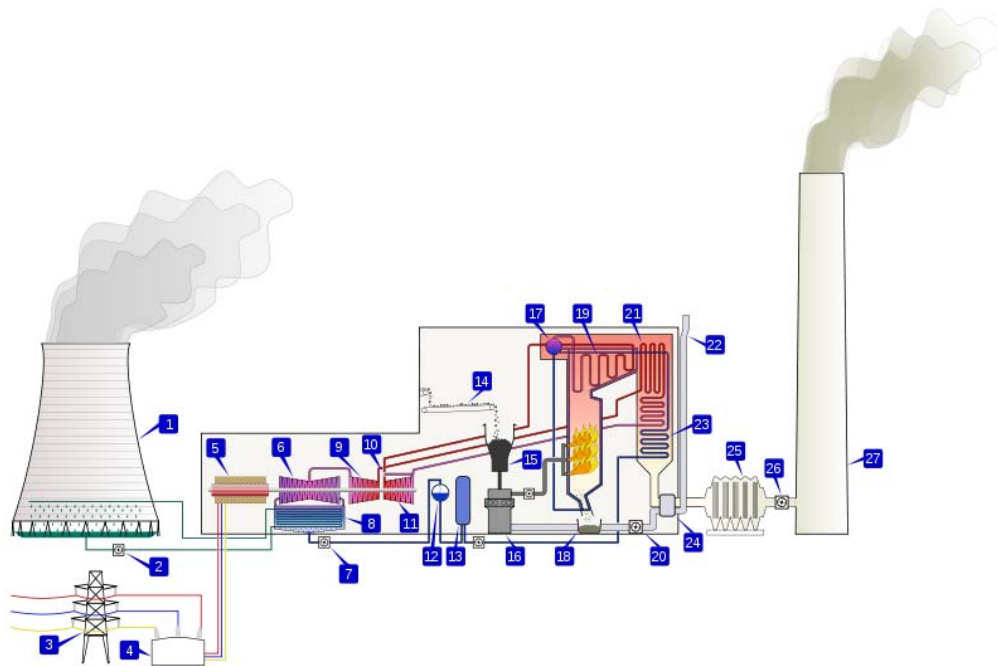


Figura 2.6. Central termoeléctrica convencional.

Tabla 2.6. Componentes de una central termoeléctrica convencional.

NUMERACIÓN EN LA FIGURA 2.6	NOMBRE CARACTERISTICO
1	TORRE DE REFRIGERACIÓN
2	BOMBA HIDRÁULICA
3	LÍNEA DE TRANSMISIÓN(TRIFÁSICA)
4	TRANSFORMADOR(TRIFÁSICO)
5	GENERADOR ELÉCTRICO(TRIFÁSICO)
6	TURBINA DE VAPOR DE BAJA PRESIÓN
7	BOMBA DE CONDENSACIÓN
8	CONDENSADOR DE SUPERFICIE
9	TURBINA DE MEDIA PRESIÓN
10	VÁLVULA DE CONTROL DE GASES
11	TURBINA DE VAPOR DE ALTA PRESIÓN
12	DESGASIFICADOR
13	CALENTADOR
14	CINTA TRANSPORTADORA DE CARBÓN
15	TOLVA DE CARBÓN
16	PULVERIZADOR DE CARBÓN
17	TAMBOR DE VAPOR
18	TOLVA DE CENIZAS)
19	SUPERCALENTADOR
20	VENTILADOR DE TIRO FORZADO
21	RECALENTADOR
22	TOMA DE AIRE DE COMBUSTIÓN
23	ECONOMIZADOR
24	PRECALENTADOR DE AIRE
25	PRECIPITADOR ELECTROSTÁTICO
26	VENTILADOR DE INDUCIDO
27	CHIMENEA DE EMISIONES

En la actualidad se están construyendo numerosas centrales termoeléctricas de las denominadas de ciclo combinado, que son un tipo de central que utiliza gas natural, gasóleo o incluso carbón preparado como combustible para alimentar una turbina de gas. Luego los gases de escape de la turbina de gas todavía tienen una elevada temperatura, se utilizan para producir vapor que mueve una segunda turbina, esta vez de vapor. Cada una de estas turbinas está acoplada a su

correspondiente alternador para generar energía eléctrica. Normalmente durante el proceso de partida de estas centrales solo funciona la turbina de gas; a este modo de operación se lo llama ciclo abierto. Si bien la mayoría de las centrales de este tipo pueden intercambiar el combustible (entre gas y diésel) incluso en funcionamiento. Como la diferencia de temperatura que se produce entre la combustión y los gases de escape es más alta que en el caso de una turbina de gas o una de vapor, se consiguen rendimientos muy superiores, del orden del 55%.

La emisión de residuos a la atmósfera y los propios procesos de combustión que se producen en las centrales térmicas tienen una incidencia importante sobre el medio ambiente. Para tratar de paliar, en la medida de lo posible, los daños que estas plantas provocan en el entorno natural, se incorporan a las instalaciones diversos elementos y sistemas. El problema de la contaminación es máximo en el caso de las centrales termoeléctricas convencionales que utilizan como combustible carbón. Además, la combustión del carbón tiene como consecuencia la emisión de partículas y ácidos de azufre que contaminan en gran medida la atmosfera. En las de fuel-oil los niveles de emisión de estos contaminantes son menores, aunque ha de tenerse en cuenta la emisión de óxidos de azufre y hollines ácidos, prácticamente nulos en las plantas de gas.

Las centrales de gas natural pueden funcionar con el llamado ciclo combinado, que permite rendimientos mayores (de hasta un poco más del 50%), lo que todavía haría las centrales que funcionan con este combustible menos contaminantes.

- **Ventajas.**

Son las centrales más baratas de construir (teniendo en cuenta el precio por megavatio instalado), especialmente las de carbón, debido a la simplicidad (comparativamente hablando) de construcción y la energía generada de forma masiva.

Las centrales de ciclo combinado de gas natural son mucho más baratas (alcanzan el 50%) que una termoeléctrica convencional, aumentando la energía térmica generada (y por tanto, las ganancias) con la misma cantidad de combustible, y rebajando las emisiones citadas más arriba en un 20%, quedando así en 0,35 kg de CO₂, por kWh producido.

- **Inconvenientes.**

El uso de combustibles fósiles genera emisiones de gases de efecto invernadero y de lluvia ácida a la atmósfera, junto a partículas volantes que pueden contener metales pesados. Al ser los combustibles fósiles una fuente de energía finita, su uso está limitado a la duración de las reservas y/o su rentabilidad económica.

Sus emisiones térmicas y de vapor pueden alterar el microclima local. Afectan negativamente a los ecosistemas fluviales debido a los vertidos de agua caliente en éstos. Su rendimiento (en muchos casos) es nulo (comparado con el rendimiento ideal), a pesar de haberse realizado grandes mejoras en la eficiencia (un 90-91% de la energía liberada en la combustión se convierte en electricidad).

- **Descripción detallada de las partes de la planta y su funcionamiento.**

El funcionamiento de todas las plantas térmicas, o termoeléctricas, es semejante. El combustible se almacena en parques o depósitos adyacentes, desde donde se suministra a la planta, pasando a la caldera, en la que se provoca la combustión. Esta, se emplea para calentar el agua, que se encuentra en la caldera, y producir el vapor. Este con una alta presión, hace girar los álabes de la turbina, cuyo eje rotor gira solidariamente con el de un generador que produce la energía eléctrica; esta energía se transporta mediante líneas de alta tensión a los centros de consumo. Por su parte, el vapor es enfriado en un condensador y convertido otra vez en agua, que vuelve a los tubos de la caldera, comenzando de nuevo el ciclo.

El agua en circulación que refrigera el condensador expulsa el calor extraído a la atmósfera a través de las torres de refrigeración, grandes estructuras que identifican estas plantas; parte del calor extraído pasa a un río próximo, lago o al mar. Las torres de refrigeración son enormes cilindros contraídos a media altura (hiperboloides), que emiten constantemente, vapor de agua (que se forma durante el ciclo) no contaminante, a la atmósfera. Para minimizar los efectos contaminantes de la combustión sobre el entorno, la planta dispone de una chimenea de gran altura llegan a los 300 m y de unos precipitadores que retienen las cenizas y otros volátiles de la combustión. Las cenizas se recuperan para su aprovechamiento en procesos de metalurgia y en el campo de la construcción, donde se mezclan con el cemento.

- **Nuevas Tecnologías.**

Se están llevando a cabo investigaciones para obtener un mejor aprovechamiento del carbón, como son la gasificación del carbón "in situ" o la aplicación de máquinas hidráulicas de arranque de mineral y de avance continuo, que permiten la explotación de yacimientos de poco espesor o de yacimientos en los que el mineral se encuentra demasiado disperso o mezclado.

El primero de los sistemas mencionados consiste en inyectar oxígeno en el yacimiento, de modo que se provoca la combustión del carbón y se produce un gas aprovechable para la producción de energía eléctrica mediante centrales instaladas en bocamina. El segundo, en lanzar potentes chorros de agua contra las vetas del mineral, lo que da lugar a barros de carbón, los cuales son evacuados fuera de la mina por medios de tuberías. Otras nuevas tecnologías que están siendo objeto de investigación pretenden mejorar el rendimiento de las centrales termoeléctricas de carbón, actualmente situado entre el 30 y el 40%. Destaca entre ellas la combustión del carbón en lecho fluidificado, que según determinadas estimaciones permitiría obtener rendimientos de hasta el 50%, disminuyendo al mismo tiempo la emisión de anhídrido sulfuroso. Consiste en quemar carbón en un lecho de partículas inertes (de caliza, por ejemplo), a través del cual se hace pasar una corriente de aire. Esta soporta el peso de las partículas y las mantiene en suspensión, de modo que da la impresión de que se trata de un líquido en ebullición.

Otras investigaciones, por último, intentan facilitar la sustitución del fuel-oil en las centrales termoeléctricas para contribuir a reducir la dependencia respecto del petróleo. Cabe citar en este sentido proyectos que pretenden conseguir una

adecuada combustión de mezclas de carbón y fuel (coal-oil mixture: COM) o de carbón y agua (CAM) en las centrales termoeléctricas equipadas para consumir fuel-oil.

2.2.3. Calderas recuperadoras.

Las calderas de recuperación de calor son un componente esencial en el diseño de las plantas de potencia de ciclo combinado. La optimización de sus parámetros de operación permite maximizar el trabajo que se obtendrá en el ciclo de vapor y con ello mejorar la eficiencia de la generación. Estas calderas, son esencialmente un sistema de intercambio de calor a contracorriente, consistiendo en una serie de sobre calentadores, evaporadores y economizadores ordenados desde la entrada del gas hasta su salida de forma que sea máxima la recuperación de calor y se suministre vapor a las condiciones de temperatura y presión que requiera la turbina de vapor.

2.2.3.1 Simulación de procesos apoyada por computadoras.

Se conoce como simulación matemática la representación de un proceso, o algunas de sus partes, mediante un modelo matemático con el objetivo de estudiar o reproducir en detalle su comportamiento. Se plantea además, que simulación es la creación de modelos matemáticos a partir de un grupo de variables, las cuales permiten estudiar y predecir el comportamiento de un proceso químico, físico o biológico. Por lo general esos modelos matemáticos están conformados por ecuaciones obtenidas a partir de balances de materia y energía en el sistema, las ecuaciones de diseño, las ecuaciones cinéticas y las que permiten realizar la estimación de propiedades aunque existen casos en que al modelar un sistema

poco conocido se hace necesario utilizar ecuaciones empíricas y en algunas ocasiones hasta probabilísticas.

Por lo general, la modelación matemática de un proceso químico resulta en un número elevado de ecuaciones, donde la solución puede hacerse bien compleja. Por esta razón el hombre se ha visto en la necesidad de desarrollar herramientas computacionales que permitan agilizar y facilitar la simulación de procesos. Los primeros estudios de simulación en sistemas de procesos químicos fueron realizados en los comienzos de la década de los 50, mediante el uso de computadoras analógicas. Hoy en día un problema de simulación puede ser resuelto:

- Utilizando un lenguaje de programación general.
- Utilizando hojas de cálculo electrónicas.
- Utilizando programas matemáticos.
- Utilizando un simulador de procesos industriales.

La solución de problemas usando simuladores de procesos industriales se ha incrementado en la misma medida en que éstos se han mejorado, comercializándose hoy en día un gran número de ellos que permiten realizar una solución rigurosa de problemas en estado estacionario y algunos en estado dinámico. Los principales programas de simulación de procesos químicos que se comercializan en la actualidad son: DESIGN II (WINSIN Inc., 2000), HYSYS (Hyprotech, 2000), ASPEN PLUS (ASPEN TECHNOLOGY Co., 2000), PRO II/PROVISION (Simulations Sciences Co., 2000) y CHEMCAD (ChemStations Co., 2000). Sus diferencias fundamentales están marcadas en cuanto al número de operaciones.

2.2.4. Componentes de una caldera de recuperación.

Una caldera de recuperación (Heat recovery Steam Generator, HRSG) aprovecha la entalpía de los gases calientes para generar un vapor, por lo que se puede describir de forma sencilla diciendo que consiste en una serie de intercambiadores de calor que utilizan un gas como fluido caliente y como fluido frío un líquido, que habitualmente será agua.

Las calderas tienen como principales ventajas:

- Un costo relativamente bajo.
- Una gran fiabilidad de operación.
- Un elevado rendimiento energético, provocando que el rendimiento energético total de la instalación de cogeneración sea bastante elevado.

Los componentes más comunes de una caldera de recuperación se detallan a continuación:

- **Economizador.**

Este elemento es el último que se sitúa en el sentido de avance de los gases de escape. Es la superficie de intercambio con menor temperatura y se calcula de forma que la temperatura de salida del agua sea inferior a la de saturación, de forma que no se produzca vapor. El agua de salida del economizador es dirigida al calderín del generador en donde se introduce en la parte baja del mismo para luego ser conducida a los tubos del generador. El diseño del economizador debe ser tal que pueda evacuar las condensaciones que se puedan dar sobre sus tubos

de intercambio de manera que se eviten las corrosiones de ácido sulfúrico cuando las temperaturas de los gases de escape desciendan de los 120° C.

- **Generador o evaporador.**

Es el intercambiador que precede al economizador, en él se produce la vaporización del agua. Lleva asociado uno o dos calderines a los que va a parar el vapor generado.

- **Calderines.**

Son los elementos donde se realiza la separación entre el vapor y el agua. Los calderines son unos depósitos cilíndricos horizontales que disponen en su interior de separadores de humedad y de secadores de vapor, se encuentran en la parte superior de la caldera, al igual que en las calderas convencionales. La mezcla agua-vapor que recorre el evaporador se introduce en el calderín a través de los separadores de humedad, donde se retiene la parte líquida siendo devuelta al generador. El vapor escapa por la parte superior del calderín, pero previamente pasa a través de los secadores, donde se obliga al vapor a seguir un recorrido tortuoso, para conseguir separar las gotas de líquido que pueda arrastrar, resbalando estas hasta llegar al fondo del calderín, donde se encuentra el agua procedente del economizador.

- **Recalentador o Sobrecalentador.**

Este componente se coloca únicamente cuando se quiere obtener vapor sobrecalentado, lo cual sucede en los ciclos combinados para la generación

eléctrica. Es el primer intercambiador que se encuentran los gases después de salir de la etapa de postcombustión y por él únicamente circula vapor.

- **Compuerta de by-pass.**

Las compuertas de by-pass tienen una doble función evacuar la totalidad de los gases de la turbina a la atmósfera en el caso de que el generador esté parado por alguna emergencia, y la de regular el caudal de gases de turbina que entran en el generador cuando la demanda de vapor es inferior a la producción con la totalidad de los gases. La compuerta de by-pass está constituida normalmente por dos compuertas que se encuentran mecánicamente enclavadas, de forma que nunca estén las dos simultáneamente cerradas. Una de ellas se encuentra a la entrada de la caldera, y la otra en la boca de la chimenea de by-pass.

- **Cámara de combustión.**

Como se ha indicado anteriormente, cuando la postcombustión es completa (inyectándose aire fresco), y se alcanzan temperaturas superiores a los 800°C, es aconsejable la instalación de una cámara de combustión. Simulación CFD de una caldera de recuperación.

2.2.5. Caldera acuotubular de recuperación.

Las acuotubulares son aquellas en las que el agua circula por el interior de los tubos, son las más comunes. Las calderas acuotubulares pueden clasificarse en tres grupos según la posición de los tubos de agua y el tipo de circulación:

- De tubos verticales y circulación natural, con los gases de escape circulando horizontalmente a través del banco de tubos del generador de vapor.
- De tubos horizontales y circulación forzada, con los gases de escape circulando verticalmente a través de los bancos de tubos del generador, economizador y recalentador.
- De tubos inclinados y circulación natural, con los gases de escape circulando en sentido vertical ascendente a través del banco de tubos del generador.

2.2.6. Caldera pirotubular de recuperación.

Las calderas pirotubulares están provistas de unos tubos a través de cuyo interior circulan los gases de combustión, estando rodeados de agua por el exterior. Los tubos se instalan normalmente en la parte inferior de un tambor sencillo, debajo del nivel del agua, de forma que nunca estén secos. Son generalmente de un solo paso y el fluido absorbe únicamente el calor de convección procedente de los gases. Tienen un peso elevado en relación con la potencia que pueden desarrollar, ya que la superficie exterior de su envolvente no puede utilizarse como superficie de intercambio de calor y además, las temperaturas de los gases son relativamente bajas. Las calderas pirotubulares pueden ser horizontales o verticales. En las primeras, prácticamente todo el espacio del cilindro de la caldera está ocupado por los tubos, el volumen del vapor se ha reducido al mínimo, usándose un domo para su recolección.

2.2.7. Elección del tipo de caldera.

La elección del diseño óptimo de la caldera de recuperación se basa en dos grandes pilares:

- La eficiencia del modelo seleccionado en torno al proceso industrial.
- El ahorro energético.

Por ello, una caldera de recuperación pirotubular, presta el inconveniente de tener un largo tiempo de puesta en régimen, debido a la gran cantidad de agua que almacenan. Además, presenta una capacidad de producción muy reducida para una C.T.C.C. (en torno a las 20ton/h).

La caldera acuotubular, puede presentar unas dimensiones que se acomoden al uso específico de este proceso industrial. Si valoramos ahora la disposición de los tubos, debemos tener en cuenta que los gases, deben circular a presión positiva hasta alcanzar la salida a la atmósfera, por lo que es interesante las pérdidas de carga en la caldera sean lo más pequeñas posibles para que no se produzcan fenómenos de contrapresión que reduzcan el rendimiento de la caldera. Por lo tanto, para una instalación industrial C.T.C.C, la más adecuada en cuanto a uso, capacidad, consumo energético y fiabilidad, podemos escoger una caldera de recuperación de calor acuotubular, de tubos horizontales en este caso concreto, además podemos concretar qué sería de circulación forzada.

Mediante circulación forzada se mantendría constante la velocidad de circulación del agua, garantizando siempre la circulación de la misma, independientemente de las condiciones de operación de la caldera, disminuyendo

el coeficiente de película, disminuyendo ligeramente la cantidad de calor transmitida por convección, pero disminuyendo también las pérdidas de carga dentro de los tubos, cosa que aumenta el trabajo y el rendimiento de la caldera.

El calor residual es el calor contenido en los productos y subproductos de un proceso, que eleva su temperatura a niveles mayores de los adecuados para su emisión o almacenaje. Este calor puede ser aprovechado de modo que se cumplan dos objetivos simultáneamente:

- Recoger y distribuir el calor para reutilizarlo en el mismo equipo o en otros.
- Disminuir la temperatura de emisión de fluidos de manera que se reduzca la contaminación térmica de la planta.

El calor residual en los efluentes de los procesos industriales supone una importante pérdida de energía térmica en la industria. El aprovechamiento de este calor aumenta significativamente la eficiencia energética de los equipos y la eficiencia global de la planta. Cuanto mayor sea la temperatura de la fuente de calor residual, mayor será la capacidad de aprovechamiento de este calor.

En general, en una planta, los equipos susceptibles de ser mejorados con medidas de recuperación de calor residual son múltiples:

- Hornos eléctricos y de gas.
- Calderas de todo tipo (gas, gasóleo, biomasa, etc.).
- Secaderos.
- Evaporadores.
- Compresores.

- Sistemas de refrigeración.
- Turbinas.
- Motores.
- Instalaciones de cogeneración.

Las líneas de aprovechamiento de calor residual son fundamentalmente dos:

Recuperación del calor residual de gases de combustión. Aproximadamente, una disminución de 20°C en la temperatura de emisión de estos gases implica un aumento del rendimiento energético de una caldera de un 1%. Dado que los gases de combustión salen muy calientes, la posible reducción de la temperatura es grande, alcanzándose ahorros significativos.

Recuperación del calor residual de otros fluidos. En este punto se incluye el aprovechamiento del calor de aguas residuales calientes procedentes de procesos de refrigeración de equipos. Las posibilidades de aprovechamiento son menores, y las temperaturas son mucho menores que en el caso de gases de combustión.

2.2.8. Recuperadores de gases de combustión.

Son los equipos diseñados para la recuperación del calor residual de los gases de combustión.

Básicamente se pueden dividir en dos tipos:

- Economizadores, en los cuales con el calor de los gases se calienta agua.
- Recuperadores o calentadores de aire, que transfieren el calor de los gases a una corriente de aire, generalmente utilizada como comburente de otro proceso de combustión.

Calentador de aire: Es un equipo auxiliar importante en calderas y hornos industriales y funciona recuperando el calor sensible de los gases de salida, tanto para reutilizarlo en el propio equipo, como para llevarlo a otra zona de la planta.

El precalentamiento del aire produce los siguientes efectos:

- Se reducen las pérdidas de calor en los gases de combustión, ahorrándose aproximadamente un 1% de combustible por cada 20 °C de reducción de la temperatura de dichos gases.
- Aumenta la temperatura de llama en la zona de combustión, incrementando el calor transferido por radiación y la cantidad de vapor producido con un menor exceso de aire comburente.
- Algunos combustibles sólo pueden ser quemados con precalentamiento del aire, como es el caso del carbón.

2.2.9. Rocío ácido.

En el proceso de combustión, el azufre contenido en el combustible se oxida a SO_2 , que puede oxidarse aún más hasta SO_3 . El trióxido de azufre tiene gran tendencia a combinarse con agua para formar ácido sulfúrico, que permanece disuelto en el agua, con gran poder corrosivo. Si la temperatura desciende demasiado, se puede alcanzar el punto de rocío de esta disolución, condensándose gotas de concentración alta, debido al equilibrio. El fenómeno del rocío ácido hace necesario llegar a un valor óptimo de la reducción de la temperatura de los gases, equilibrando el ahorro energético que supone recuperar más calor, con el gasto consecuencia de reducir la vida útil de los tubos por corrosión.

2.2.10. Calor sensible y calor latente.

Calor sensible: es el calor que se emplea en variar la temperatura de un cuerpo, en este caso agua o fluido térmico. Está relacionado con el calor específico, que en caso del agua líquida es de $1\text{kcal/kg}^\circ\text{C}$.

Calor latente: es el calor empleado en producir un cambio de estado en un cuerpo, como por ejemplo la vaporización del agua, cuyo calor latente de vaporización/condensación es de 540kcal/kg (a 100°C).

CAPÍTULO III

MARCO METODOLOGICO

3.1. Tipo de investigación.

El tipo de Investigación según el enfoque es descriptiva y proyectiva, porque se evalúan los aspectos operativos directamente relacionados con los equipos del sistema de recuperación de una caldera; es decir, abarca la descripción, recopilación y análisis de información necesaria para la evaluación del equipo y se diseña o calcula su capacidad.

La investigación según la estrategia es una modalidad documental de campo. La investigación documental se aplica ya que se procedió a recolectar los datos operativos de una planta termoeléctrica; así como también, las exigencias paramétricas de capacidad de una caldera recuperadora.

La investigación de campo se emplea porque existe un hecho determinado permitiendo constatar las condiciones reales de operación de un sistema recuperador de calor garantizando un mayor nivel de confianza de la información obtenida.

3.2. Técnicas de recolección de datos.

3.2.1. Observación Directa.

La observación directa sirvió para identificar y describir los distintos equipos que componen una caldera de recuperación, situaciones y funciones que cumplen

en un sistema térmico de una planta termoeléctrica, registrando información valiosa para su posterior análisis.

3.2.2. Revisión de Documentos.

Se realizó una revisión de los manuales de operación de plantas termoeléctricas a vapor, manuales y textos de calderas así mismo, sobre inspección y mantenimiento de este tipo de equipos.

3.3. Etapas de la investigación.

El desarrollo de esta investigación está basado en etapas, como sigue:

Etapas I: Revisión Bibliográfica.

A través de esta primera etapa se llevó a cabo la recopilación de información relacionada con los fundamentos teóricos de sistemas, equipos o elementos componentes de calderas recuperadoras, como los son, economizador, calentador, y cámara de combustión, entre otros; criterios de diseño; así como también método de inspección de los mismos. De igual manera se consultaron los antecedentes que puedan existir a esta investigación. El estudio de dicha información brindó el soporte teórico para la realización de la monografía. En esta etapa se buscó la información acerca de los elementos involucrados en el problema, por vía impresa (libros, textos, revistas, tesis) y digital (Internet, documentos, archivos, notas técnicas) para así obtener los conocimientos necesarios para manejar el problema y a su vez recopilar la información plasmada en el informe del trabajo monografía.

Etapa II: Descripción del funcionamiento de una planta termoeléctrica y específicamente de una Caldera recuperadora de calor.

Basándose en el manual de operaciones de una planta termoeléctrica, se describió el funcionamiento de una caldera, basado en la operación y generación de vapor, tomando en cuenta todas las condiciones y normativas pertinentes, se procedió a establecer un procedimiento e instructivo de operación para dicho sistema recuperador de calor.

Etapa III: Evaluación de los parámetros de diseño necesarios para la propuesta de la ingeniería conceptual y básica de la Caldera recuperadora de calor.

Basándose en las condiciones establecidas para la operación de la caldera recuperadora e calor, se evaluaron los parámetros necesarios para el posterior cálculo de la terminología parametrizadora real de la misma.

Etapa IV: Cálculos de diseño, basados en la evaluación de parámetros, que permitan el dimensionamiento y estimación de la capacidad de la caldera recuperadora de calor.

Una vez evaluados los parámetros, se procedió a calcular los términos básicos para el dimensionamiento y parametrización de la capacidad de la caldera. Se usaron acá las ecuaciones características para el cálculo de calderas y de su rendimiento.

Etapa V: Formulación de una hoja de cálculos, mediante la cual, se estime la capacidad en función de la demanda.

En esta etapa se formuló el uso de una hoja de cálculo en excel para determinar el rendimiento de la caldera en función de su capacidad y carga de trabajo.

Etapa VI: Análisis de las fallas que se presentan comúnmente en una caldera recuperadora de calor y en especial en una planta termoeléctrica.

Acá se analizaron las diferentes fallas o las más comunes que ocurren en una caldera recuperadora de calor y en especial en una planta termoeléctrica.

Etapa VII. Recomendación de aplicación de un plan de mantenimiento preventivo parte del aprovechamiento de la vida útil y operativa de la caldera recuperadora de calor diseñada.

Utilizando herramientas estadísticas y consideraciones de los operadores de planta, se propuso un programa de mantenimiento preventivo, con el objeto de que se garantice la continuidad operativa de una planta termoeléctrica y en especial de una caldera recuperadora.

Etapa VIII. Redacción y defensa de trabajo de grado.

Habiendo cumplido con las normas de redacción e instructivos de entrega de tesis o monografías, en cuanto a presentación y lapsos de entrega, fue redactado el informe inherente a la investigación que se acaba de describir, con el objeto de

que se obtenga la calidad esperada en la presentación, para el fácil entendimiento del mismo. El informe final tiene como contenido los capítulos resultantes de las etapas cumplidas, las conclusiones y recomendaciones del estudio, las cuales serán expuestas de manera clara y coherente con los objetivos fijados al inicio del proyecto.

CAPÍTULO IV

DESARROLLO DE LA MONOGRAFIA

4.1. Descripción del funcionamiento de una planta termoeléctrica y específicamente, el de una caldera recuperadora de calor dentro de la misma

Para el logro de este objetivo, se muestra un esquema o diagrama explicativo de cómo funciona la planta y el ejemplo a desarrollar, en este caso con una caldera recuperadora de calor.

El funcionamiento de todas las plantas térmicas, o termoeléctricas, es semejante. El combustible se almacena en parques o depósitos adyacentes, desde donde se suministra a la planta, pasando a la caldera, en la que se provoca la combustión. Esta, se emplea para calentar el agua, que se encuentra en la caldera, y producir el vapor. Este con una alta presión, hace girar los álabes de la turbina, cuyo eje del rotor gira solidariamente con el de un generador que produce la energía eléctrica; esta energía se transporta mediante líneas de alta tensión a los centros de consumo. Por su parte, el vapor es enfriado en un condensador y convertido otra vez en agua, que vuelve a los tubos de la caldera, comenzando de nuevo el ciclo.

El agua en circulación que refrigera el condensador expulsa el calor extraído a la atmósfera a través de las torres de refrigeración, parte del calor extraído pasa a un río próximo, lago o al mar. Las torres de refrigeración son enormes cilindros contraídos a media altura (hiperboloideas), que emiten constantemente, vapor de agua (que se forma durante el ciclo) no contaminante, a la atmósfera. En una central eléctrica el ciclo de gas genera energía eléctrica mediante una o varias

turbinas de gas y el ciclo de vapor de agua lo hace mediante una turbina de vapor. El principio sobre el cual se basa es utilizar los gases de escape a alta temperatura de la turbina de gas para aportar calor a la caldera o generador de vapor de recuperación, la que alimenta a su vez de vapor a la turbina de vapor. La principal ventaja de utilizar el ciclo combinado es su alta eficiencia, ya que se obtienen rendimientos superiores al rendimiento de una central de ciclo único y mucho mayores que los de una de turbina de vapor.

Consiguiendo aumentar la temperatura de entrada de los gases en la turbina de gas, se obtienen rendimientos de la turbina de gas cercanos al 60%, exactamente 57,3% en las más modernas turbinas siemens. Este rendimiento implica una temperatura de unos 1.350 °C a la salida de los gases de la cámara de combustión. El límite actualmente es la resistencia a soportar esas temperaturas por parte de los materiales cerámicos empleados en el recubrimiento interno de las cámaras de combustión de esas turbinas. Las centrales de ciclo combinado son, como todas ellas, contaminantes para el medio ambiente y para los seres vivos, incluidas las personas, por los gases tóxicos que expulsan al ambiente. No obstante es la que menos contamina de todas las industrias de producción de electricidad, por quema de combustible fósil. Básicamente las emisiones son de CO₂. Las emisiones de NO_x y SO₂ son insignificantes, no contribuyendo por tanto a la formación de lluvia ácida. Dependiendo estos efluentes gaseosos del tipo de combustible que se quemó en la turbina de gas.

Un ciclo combinado ayuda a absorber una parte del vapor generado en el ciclo joule y permite, por ello, mejorar la recuperación térmica, o instalar una turbina de gas de mayor tamaño cuya recuperación térmica no estaría aprovechada si no se utilizara el vapor en una segunda turbina de contrapresión.

En la figura 4.1, se muestra un esquema básico de funcionamiento de una planta eléctrica.

Una variante del ciclo combinado de contrapresión clásico, es el ciclo combinado a condensación que se realiza en procesos estrictamente cogenerativos. Se basa en una gran capacidad de regulación ante demandas de vapor muy variables. El proceso clásico de regulación de una planta de cogeneración consiste en evacuar gases a través del bypass cuando la demanda de vapor es menor a la producción y utilizar la post-combustión cuando sucede lo contrario. Bajando sensiblemente su potencia, no se consigue su adaptación a la demanda de vapor, debido a una importante bajada en el rendimiento de recuperación, ya que los gases de escape mantienen prácticamente su caudal y bajan ostensiblemente su temperatura. Por ellos, las pérdidas de calor se mantienen prácticamente constantes, y la planta deja de cumplir los requisitos de rendimiento.

Por el contrario, un ciclo de contrapresión y condensación permite aprovechar la totalidad del vapor generado, regulando mediante la condensación del vapor que no puede usarse en el proceso, produciendo una cantidad adicional de electricidad.

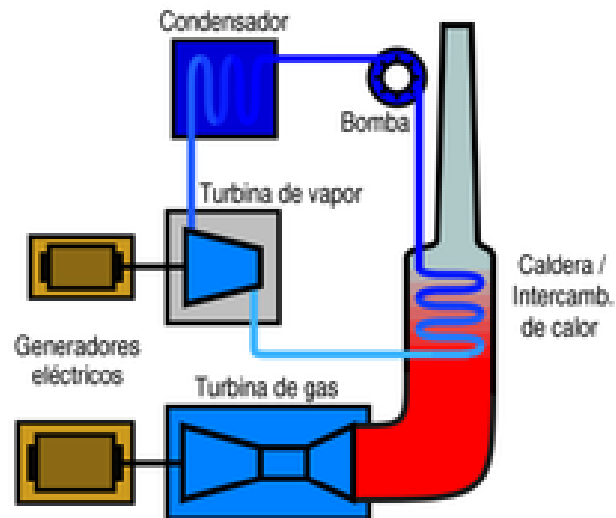


Figura 4.1. Esquema de funcionamiento de una planta termoeléctrica

En el diagrama se observa como el generador eléctrico es impulsado por una turbina a gas; mientras que una turbina a vapor impulsa otro generador eléctrico y el vapor de alta presión entra al condensador, produciendo agua que es enviada a la bomba de alimentación de la caldera que a su vez produce el vapor que impulsa la primera turbina.

Tabla 4.1. Funcionamiento de una planta térmica/de una caldera recuperadora de calor

COMPONENTES DE UNA CENTRAL TERMICA	CARACTERÍSTICAS – FUNCION
TURBOGENERADOR	<p>En él tienen lugar las siguientes conversiones de energía:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Energía calorífica del vapor a energía cinética en las toberas de la turbina. • Energía cinética del vapor a energía mecánica en los álabes, la que se recoge en la flecha de la turbina. • Energía mecánica o energía eléctrica, de la flecha al embobinado del generador.
GENERADOR DE VAPOR	<p>El término de generador de vapor o caldera se aplica normalmente a un dispositivo que genera vapor para producir energía, para procesos o dispositivos de calentamiento. Las calderas se diseñan para transmitir calor de una fuente externa de combustión a un fluido (agua) contenido dentro de ella</p> <p>La caldera está compuesta por equipos como ventiladores de aire y gases, precalentadores de aire, ductos, chimenea, economizador, domo, hogar, sobrecalentador, recalentador, quemadores, accesorios, instrumentos, etc.</p>
CONDENSADOR	<p>La condensación el vapor de escape de la turbina y drenes se efectúa en el condensador, además de la extracción de algunos gases.</p>

<p>TORRE DE ENFRIAMIENTO</p>	<p>Las torres de enfriamiento son dispositivos de enfriamiento artificial de agua. Se clasifican como intercambiadores de calor entre un volumen en circuito cerrado de agua y aire atmosférico.</p> <p>Básicamente las torres de enfriamiento son intercambiadores de calor de mezcla, efectuando la transmisión de calor por cambio de sustancia y convección entre los medios. El agua cede calor al aire sobre todo por evaporación, lo hace también por convección, pero en forma secundaria.</p>
<p>TANQUES</p>	<p>Los códigos o normas sobre diseño de recipientes o tanques tienen como objeto principal que la fabricación se haga con la seguridad requerida a una economía razonable. Todos los tanques estarán provistos con los aditamentos necesarios para cumplir con su funcionamiento y los reglamentos de seguridad.</p> <p>Usos de los tanques</p> <ul style="list-style-type: none"> • Almacenamiento de condensado • Servicio diario de aceite combustible • Almacenamiento de aceite combustible • Almacenamiento de agua desmineralizada o evaporada • Almacenamiento de agua cruda
<p>INTERCAMBIADOR DE CALOR</p>	<p>Después de la resistencia de los materiales, los problemas que involucran flujo de calor son los más importantes en la ingeniería.</p> <p>El calor se transfiere mediante aparatos llamados intercambiadores de calor; los principales de éstos equipos, son los siguientes:</p> <ul style="list-style-type: none"> • calentadores de agua de alimentación • calentadores de combustible • generadores de vapor • evaporadores • enfriadores de agua • enfriadores de aceite • condensador

TANQUES	<p>Los códigos o normas sobre diseño de recipientes o tanques tienen como objeto principal que la fabricación se haga con la seguridad requerida a una economía razonable. Todos los tanques estarán provistos con los aditamentos necesarios para cumplir con su funcionamiento y los reglamentos de seguridad.</p> <p>Usos de los tanques</p> <ul style="list-style-type: none"> • Almacenamiento de condensado • Servicio diario de aceite combustible • Almacenamiento de aceite combustible • Almacenamiento de agua desmineralizada o evaporada • Almacenamiento de agua cruda
BOMBAS	<p>De acuerdo con el mecanismo que mueve el flujo, las bombas se clasifican en:</p> <ul style="list-style-type: none"> • centrífugas • rotatorias • alternativas

4.1.1. Partes constitutivas de la caldera.

En forma general una caldera está constituida por los siguientes elementos principales:

- Superficies Evaporativas o Caldera propiamente dicha.
- Hogar.
- Quemador

- Conductos para la alimentación de aire para la combustión y de evacuación de los gases productos de la combustión, incluyendo la chimenea.
- Equipos y Mecanismos Auxiliares (Tanques de Alimentación, Bombas de alimentación, tratamiento de agua. Ventiladores de Tiro inducido y forzado, etc.)

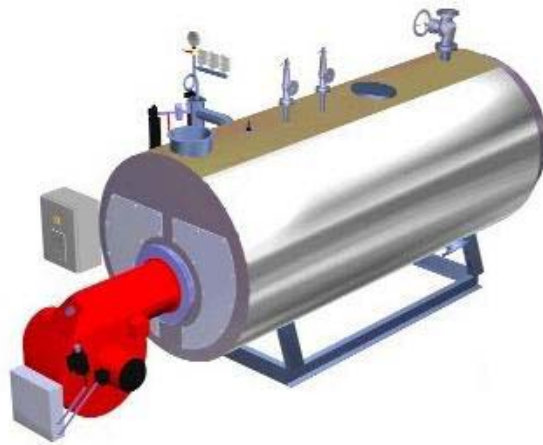


FIGURA 4.2 Vista en Perspectiva Caldera Piro-tubular

4.1.2. Componentes de Seguridad de una caldera.

- Válvulas de Seguridad o Alivio
- Detector de llama o Foto celda
- Control de presión de seguridad o límite
- Control auxiliar de bajo nivel de agua
- Alarmas tipo acústica o visual

Con el fin de la mayor eficiencia en la utilización de la energía del combustible, las calderas pueden contar con otras superficies de calentamiento tales como:

- Economizadores
- Sobrecalentador
- Calentadores de Aire

El cuerpo de 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.

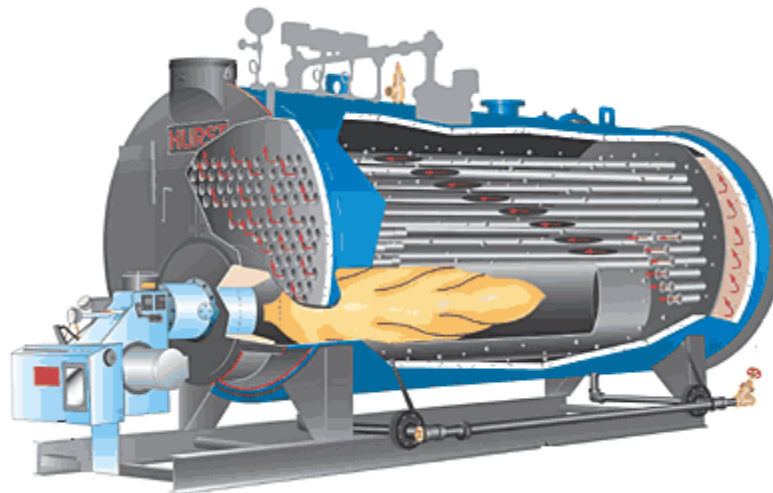
El acceso al cuerpo lado gases, se realiza mediante puertas atornilladas y abisagradas en la cámara frontal y posterior de entrada y salida de gases, equipadas con bridas de conexión. El conjunto completo, calorífugado y con sus accesorios, se asienta sobre un soporte deslizante y bancada de sólida y firme construcción suministrándose como unidad compacta y dispuesta a entrar en funcionamiento tras realizar las conexiones e instalación.

4.2. Evaluación de los parámetros de diseño necesarios para la propuesta de la ingeniería conceptual y básica de la caldera recuperadora de calor.

Se evaluaron los parámetros básicos de funcionamiento de la caldera de recuperación como se muestran en la tabla 4.2.

Tabla 4.2. Parámetros operativos de la caldera ejemplo de la investigación.

Nº	DESCRIPCIÓN	MAGNITUD
1	Caudal Másico de vapor (de operación)	1433,25 lb/h
2	Presión promedio de trabajo (Presión del vapor a la salida)	56,88lb/pulg ²
3	Temperatura a la salida del vapor	288,5 °F
4	Presión de ingreso Agua	14,22lb/pulg ²
5	Temperatura de ingreso del Agua	158 °F
6	Caldera Piro-tubular	3 pasos

**FIGURA 4.2. Caldera Piro-tubular**

Estos son los parámetros suministrados por el cliente, datos de placa de la disponibilidad y requerimiento para la ingeniería básica y conceptual. La caldera

será alimentada con combustible diesel el cual tiene un poder calorífico de 12956,904BTU/lb, una densidad 57,451lb/pie³, a una temperatura 77°F. Con estos valores vamos a trabajar en el diseño requerido. Ello servirá para alimentar a una planta generadora con turbina marca Westinghouse, con un generador de 3750 rpm, 110 voltios, DC.

Evaluando estos parámetros suministrados como requerimientos de diseño, se procederá a continuación a realizar los cálculos necesarios para la parametrización de la caldera de recuperación.

4.3. Cálculos de diseño, basados en la evaluación de parámetros, que permitan el dimensionamiento y estimación de la capacidad de la caldera recuperadora de calor

Para calcular y diseñar los parámetros de operación de la caldera y su dimensionamiento, veamos primero el esquema de funcionamiento de una caldera recuperadora de calor.

En la figura 4.3, se observa como los gases de escape de la turbina de alta presión son enviados a la caldera para su recuperación y aprovecharlos en la generación posterior de vapor y cumplir el ciclo respectivo.

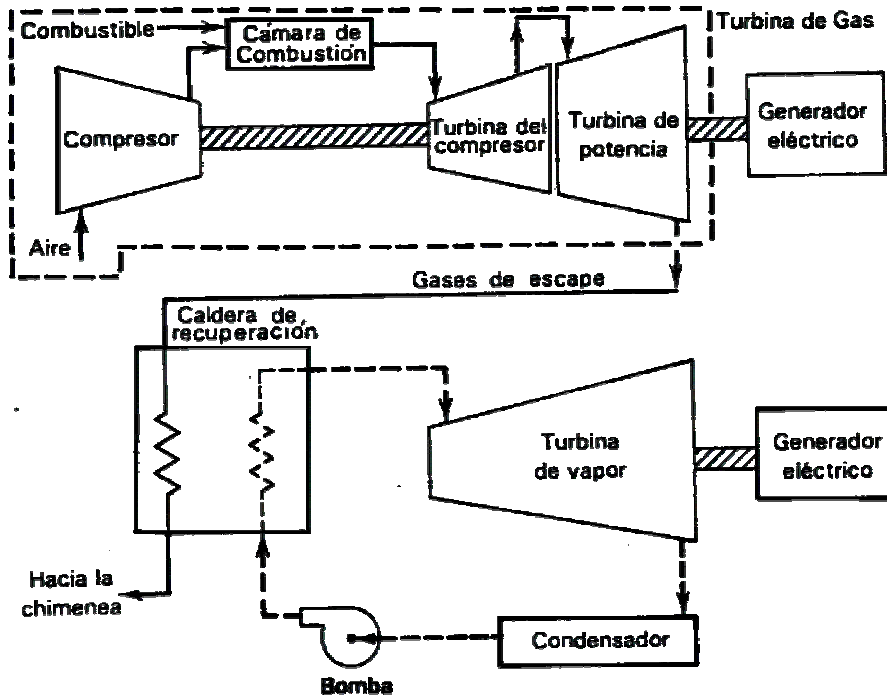


Figura 4.3. Esquema de funcionamiento de una caldera e recuperación de calor

La evaluación de las características de funcionamiento de una caldera depende de muchos factores, de los que unos pocos se pueden analizar con precisión y otros, la mayoría, son consecuencia de datos tomados en unidades operativas, como las señaladas en la tabla 4.3.

Los cálculos que se desarrollan para el diseño y dimensionamiento de la Caldera son los siguientes:

4.3.1. Estudio de la potencia de la caldera.

La potencia de la caldera se calcula por la siguiente ecuación:

$$HP = \frac{W_s(h_s - h_e)}{h_{fg}} \quad (EC.1)$$

Donde:

W_s = Caudal Másico de vapor

h_{fg} = entalpia de vaporización

h_s = entalpia de entrada (agua)

h_e = entalpia de salida (vapor)

Estas entalpías de h_s y h_{fg} se tomaron de la tabla de vapor del libro Van Wylen de termodinámica, versión SI, la entalpia de h_e se calculo por la ec 2.

Se realiza el diagrama termodinámico para identificar los estados:

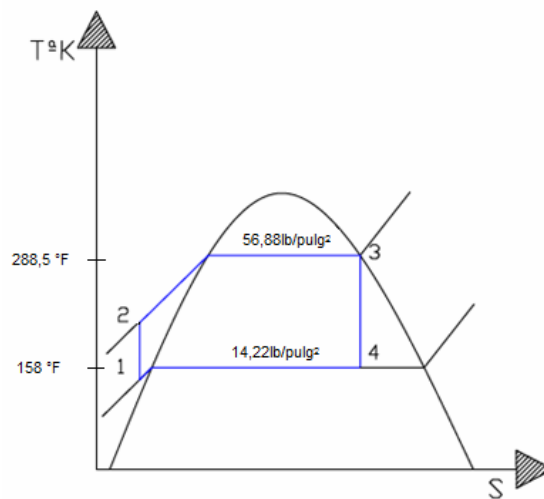


Figura 4.4. Diagrama termodinámico de estados

Propiedades termodinámicas en el punto entrada:

$$P = 14,22 \text{ lb/pulg}^2$$

$$T = 158 \text{ }^\circ\text{F}$$

$$C_{p_{\text{agua}}} = 1 \text{ BTU/lb }^\circ\text{F}$$

$$h_e = ?$$

$$\int_0^1 dh = \int_0^{158} c_p dt \quad (\text{EC.2})$$

$$h_e = 158 \text{ BTU/lb}$$

Propiedades termodinámicas en el punto salida:

$$P = 56,88 \text{ lb/pulg}^2$$

$$T = 288,5 \text{ }^\circ\text{F}$$

$$C_{p_{\text{agua}}} = 1 \text{ BTU/lb }^\circ\text{F}$$

$$h_s = 1176,4149 \text{ BTU/lb}$$

$$h_{fg} = 1074,8291 \text{ BTU/lb}$$

$$1 \text{ HP} = 1 \text{ BHP} = 34,5 \text{ lb vapor/h}$$

Sustituyendo en la ecuación 1:

$$HP_{op} = \frac{1433,25 \text{ lb/h} (1176,4149 \text{ BTU/lb} - 158 \text{ BTU/lb})}{1074,8291 \text{ BTU/lb}} \frac{1 \text{ hp}}{34,5 \text{ lb/h}}$$

$$HP_{op} = 39.3629 \text{ hp}$$

La potencia de diseño tiene que ser superior a la potencia de trabajo (operación) por lo tanto se toma un 20% como factor de seguridad:

$$HP_{\text{diseño}} = 39.3629 + 39.3629 \times 0,2$$

$$HP_{\text{diseño}} = 47,2355 \approx 50\text{hp}$$

Con la potencia de diseño se calcula el caudal másico del vapor de diseño (W_s) que puede proporcionar esta caldera.

Despejando W_s de la ecuación 1 quedando de la siguiente manera:

$$W_s = \frac{HP_{\text{Diseño}} \times 15.44 \times h_{fg}}{(h_s - h_f)} \quad (\text{EC.3})$$

$$W_s = \frac{50 \text{ hp} (34,5 \times 1074,8291 \text{ BTU/lb})}{(1176,4149 \text{ BTU/lb} - 158 \text{ BTU/lb})}$$

$$W_s = 1820,558 \text{ lb/h} \approx 1821 \text{ lb/h}$$

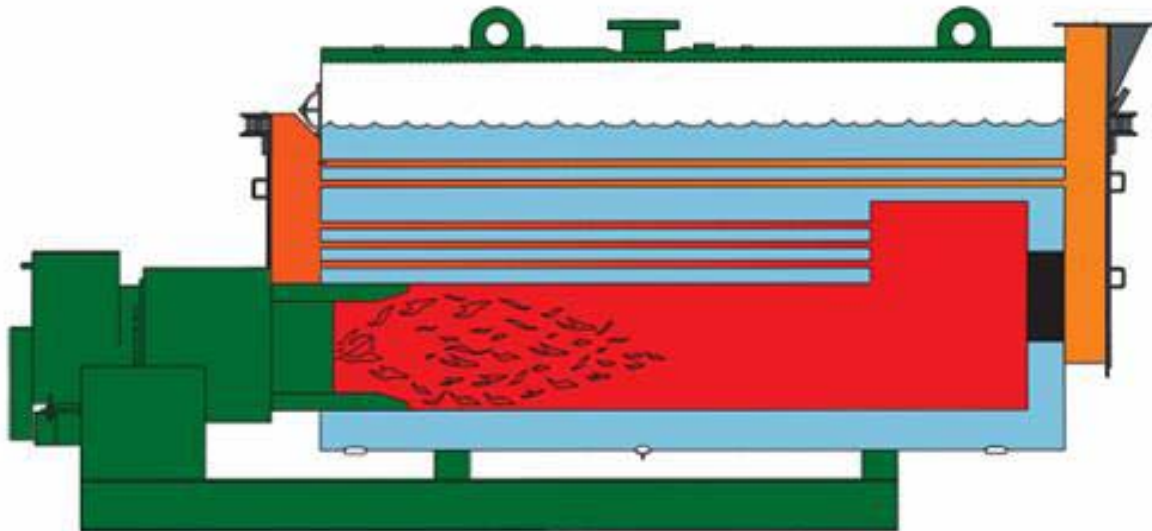


FIGURA 4.5. Esquema de Flujo de Agua y Calor.

4.3.2. Estudio del cuerpo.

El cuerpo está formado por:

- Coraza
- 2 Espejos
- 2 Carretes
- 2 Tapas
- Tubos
- Hogar

Una caldera equivale a un intercambiador de calor, en donde el fluido caliente circula por el interior de los tubos y el fluido frío por el exterior de los mismos, la mayoría de casas constructoras para el diseño de número de pasos del fluido interno le dan tres pasos, y para el fluido externo un solo paso.

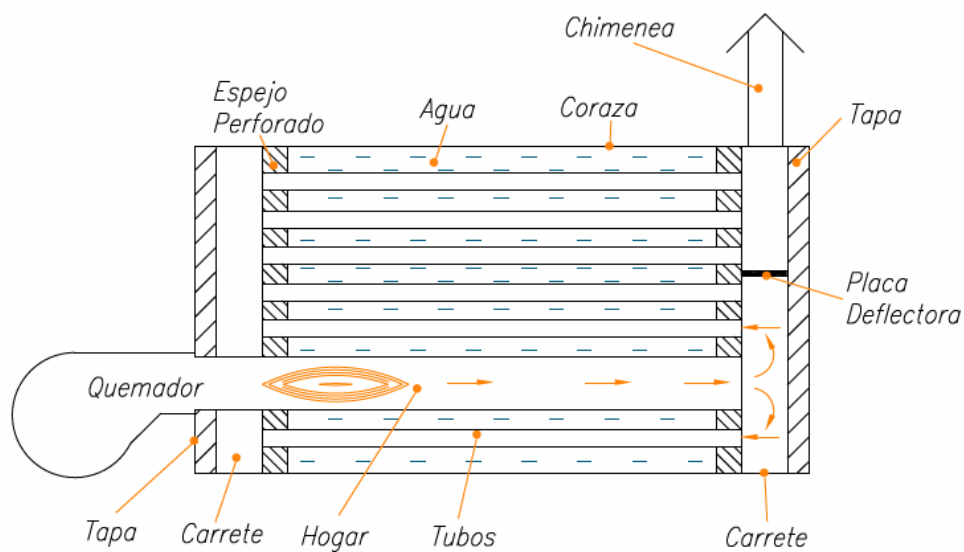


FIGURA 4.6. Diagrama de la Caldera.

4.3.3. Estudio de los tubos.

Para potencias relativamente bajas se recomienda tubos sin costuras con las siguientes características:

4.3.3.1. Longitud.

La longitud de los tubos se dan por formulas experimentales, en los que cada una de ellas es una función de la potencia.

Longitud de los tubos:

$$L=0,0048*HP+0,3 \quad (EC.4)$$

$$L=0,0048*50hp+0,3$$

$$L= 2,7m=8,8583 \text{ pies}$$

Área de cada tubo:

$$A= \pi* D* L \quad (EC.5)$$

$$D=2,375\text{pulg}=0,19792\text{pie}$$

$$A= \pi*0,19792\text{pie}*8,8583\text{pies}$$

$$A= 5,5050 \text{ pies}^2$$

4.3.3.2. Diámetro

**Tabla 4.3 Dimensiones y Presiones de trabajo de tubería de Cedula (Pipe)
ASTM A312**

Diámetro nominal NPS	Diam. Ext.		Cedula 40					
	pg	mm	Grosor Pared		Presión Int. Trab.		Peso Aprox.	
			pg	mm	PSI	Kg/m	Lb/pie	Kg/m
1/8	.405	10.29	.068	1.73	6170	434	.25	.37
1/4	.540	13.72	.088	2.24	5970	420	.43	.63
3/8	.675	17.15	.091	2.31	4810	338	.57	.85
1/2	.840	21.34	.109	2.77	4610	324	.85	1.27
3/4	1.050	26.67	.113	2.87	3750	264	1.13	1.69
1	1.315	33.40	.133	3.38	3510	247	1.68	2.50
1 1/4	1.660	42.16	.140	3.56	2880	202	2.27	3.39
1 1/2	1.900	48.26	.145	3.68	2590	182	2.72	4.05
2	2.375	60.33	.154	3.91	2180	153	3.65	5.45
2 1/2	2.875	73.03	.203	5.16	2390	168	5.79	8.64
3	3.500	88.90	.216	5.49	2070	146	7.58	11.30
3 1/2	4.000	101.60	.226	5.76	1890	133	9.11	13.58
4	4.500	114.30	.237	6.02	1750	123	10.79	16.09
6	6.625	168.28	.280	7.11	1395	98	18.97	28.28
8	8.625	219.08	.322	8.18	1227	86	28.55	45.57
10	10.750	273.05	.365	9.27	1113	78	40.48	60.36

- Diámetro exterior: **2,375 pulg.**

- Diámetro interior=Dexterior -2*Espesor=**2.067pulg**
- Espesor: **0,154pulg**.

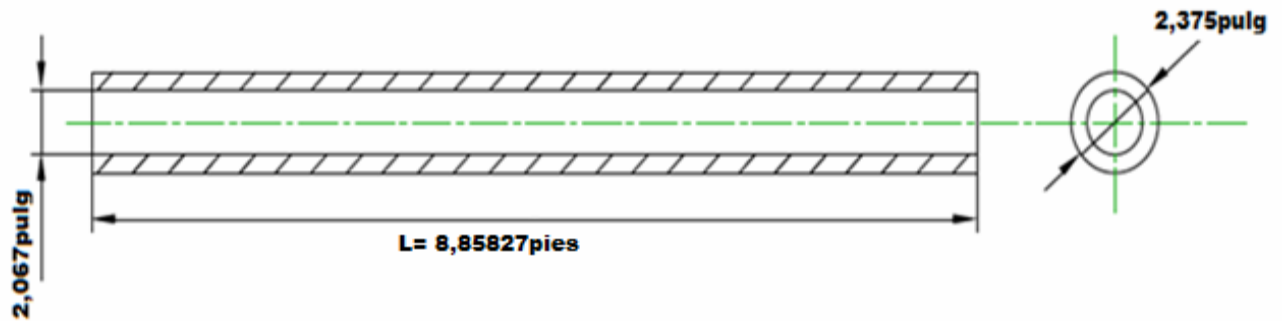


FIGURA 4.7 Esquema del tubo para la caldera.

4.3.4. Estudio del área de calentamiento.

Esta área tiene parámetros diferentes a los que tiene si el combustible es sólido, este valor es una función de la potencia de la caldera:

$$\text{Área de calentamiento} = 0,465 * \text{HP} - 0,004 \quad (\text{EC.6})$$

$$\text{Área de calentamiento} = 0,465 * 50 \text{hp} - 0,004$$

$$\text{Área de calentamiento} = 23,246 \text{m}^2 = 250,127 \text{pies}^2$$

4.3.5. Estudio del número de tubos.

$$\text{N}^\circ \text{ de tubos} = \frac{\text{Área de calentamiento}}{\text{Área externa de los tubos}} \quad (\text{EC.7})$$

$$\text{N}^\circ \text{ de tubos} = \frac{36031,3 \text{ pulg}^2}{\pi * 2,375 \text{ pulg} * 106,299 \text{ pulg}}$$

N°= 45,45 \approx 46 tubos.

Este numero de tubos se puede aumentar o quitar dependiendo del diseño sobre el cual se trabaja.

4.3.5.1 Calculo peso total tubos.

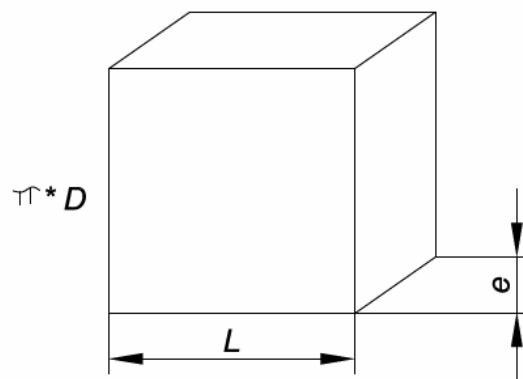


FIGURA 4.8. Tubo único.

$$V = A * L * e \quad (EC.8)$$

$$A = 2,375 \text{ pulg} = 0,19792 \text{ pies}$$

$$L = 106,299 \text{ pulg} = 8,85825 \text{ pies}$$

$$e = 0,154 \text{ pulg} = 0,01283 \text{ pies}$$

$$V = (\pi * 0,19792 \text{ pies} * 8,85825 \text{ pies} * 0,01283 \text{ pies})$$

$$\mathbf{V = 0,076 \text{ pies}^3}$$

$$P = V * d$$

$$\text{Donde: } d = \text{densidad } 450 \text{ lb/pies}^3$$

$$P = 0,0706 \text{ pie}^3 * 450 \text{ lb/pies}^3$$

$$P = 31,784 \text{ lb.c/Tub}$$

Peso total tubos=31,784*46 lb

Peso total tubos=1462,056lb

4.3.5.2 Distribución de los tubos en el espejo.

Los tubos en el espejo deben tener una distribución de triángulo equilátero, con este tipo de distribución logramos obtener mayores eficiencias al momento que se esté produciendo la transferencia de calor.

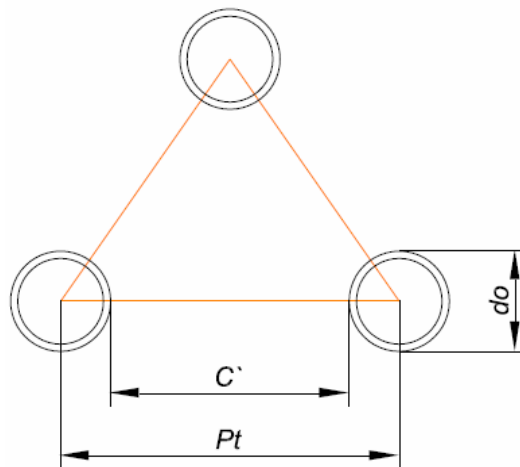


FIGURA 4.9. Cotas de los tubos

Diametro externo del tubo:

$d_0=2,375$ pulg

Calculo de Pt:

$Pt=2\text{radios}\cdot d_0$

$Pt=2\cdot 0,624\cdot 2,375$ pulg

$Pt=2,964$ pulg

Calculo de C'

$C'=0,25\cdot d_0$

$$C' = 0,25 * 2,375 \text{ pulg}$$

$$C' = 0,594 \text{ pulg}$$

En la distribución de tubos por paso se puede aceptar un error del 5% del diseño

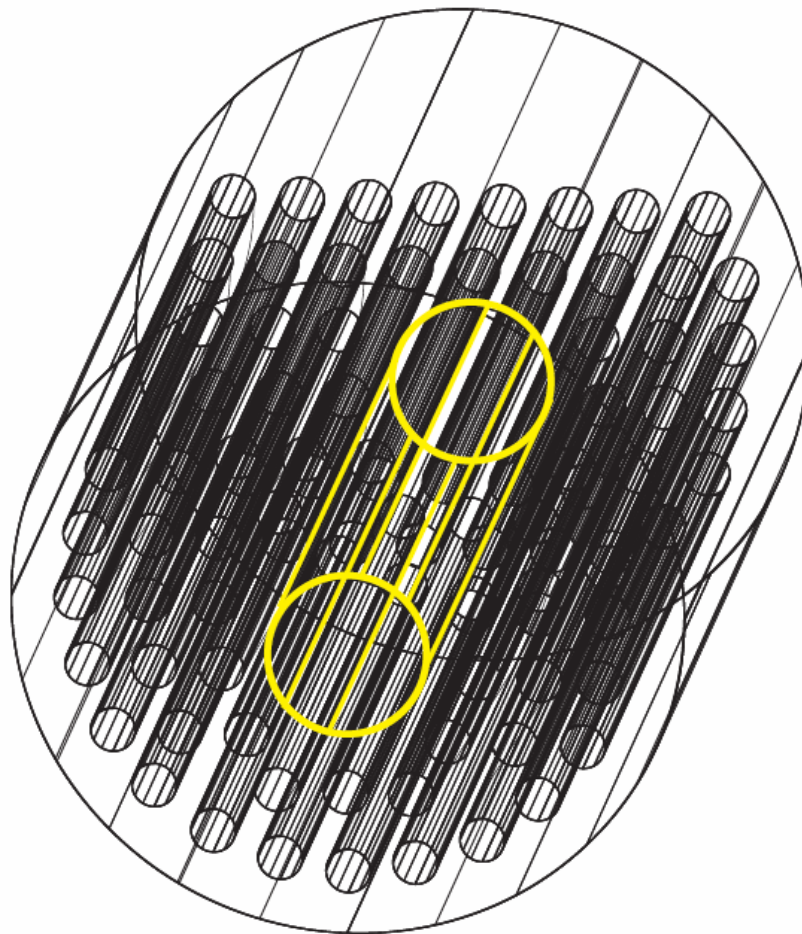


FIGURA 4.10. Ubicación de los tubos y hogar en la caldera modo 3D

4.3.6. Estudio del diámetro del espejo

Las casas comerciales que construyen calderas recomiendan Diámetros de espejo de 1,06 m o 3,5 pies. para calderas con una potencia de hasta 100hp, el espesor es un criterio particular, pudiendo ser un mínimo de 10 mm o 0,03281pies de espesor.

$$D \text{ espejo} = 3,5 \text{ pies}$$

4.3.7. Estudio del hogar.

El hogar es un tubo cuyo diámetro debe estar entre un 40% y 45% del diámetro del espejo, la posición de este tubo en el espejo depende exclusivamente del diseño, es decir que se pueda subir o puede bajar a lo largo del eje vertical, de tal forma que se asegure que sobre el mismo existan dos filas de tubos y tenga el área para acumulación de vapor.

$$\text{hogar} = 42,5\% * \text{diámetro del espejo} \quad (\text{EC.9})$$

$$\text{hogar} = 0,425 * 3,5 \text{ pies}$$

$$\text{hogar} = 1,478 \text{ pies}$$

4.3.8. Estudio del área para acumulación de vapor.

Esta área se encuentra en la parte superior del espejo, se denomina como área de acumulación de vapor; esta altura entre el agua y el domo es de un 20% del diámetro del espejo.

$$\text{Altura} = 20\% * \text{diámetro espejo} \quad (\text{EC10})$$

$$\text{Altura} = 0,2 * 3,5 \text{ pies}$$

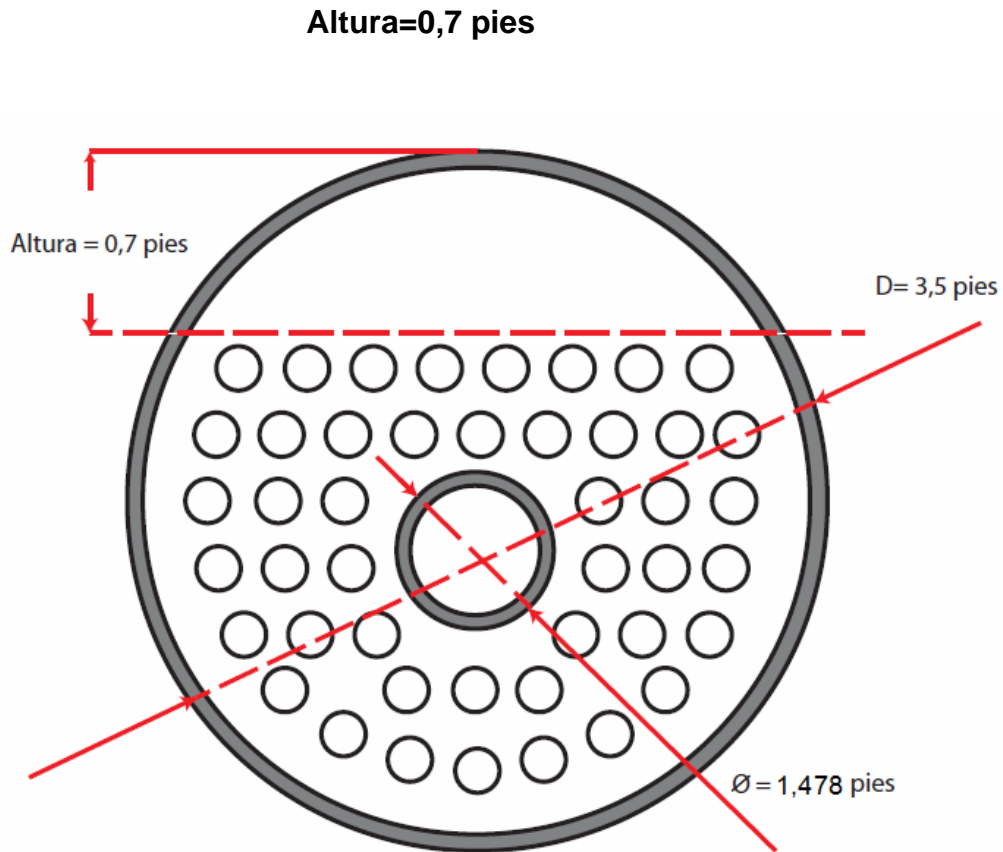


FIGURA 4.11. Cotas de área de acumulación de vapor

4.3.9. Estudio del tanque de agua.

Condición principal

Este tanque debe entregar un caudal constante durante 20 min. Este tanque garantiza el abastecimiento de agua al interior de la caldera, para evitar que la caldera se quede sin agua en su interior por eso es indispensable contar con este tanque y que el mismo tenga suficiente agua para el tiempo requerido.

$$W_s = 1821 \text{ lb/h}$$

$$\rho_{\text{agua}} = 62,43 \text{ lb/pies}^3$$

Caudal volumétrico:

$$Q = \frac{W_s}{\rho} \quad (\text{EC.11})$$

$$Q = \frac{1821 \text{ lb/h}}{62,43 \text{ lb/pies}^3}$$

$$Q = 29,169 \text{ pies}^3/\text{h}$$

Del caudal total requerido en el sistema, se determina el volumen necesario para suministrar en 20 min = 0,333 h:

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = 29,169 \text{ pies}^3/\text{h} * 0,333 \text{ h}$$

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = 9,723 \text{ pies}^3$$

El volumen del líquido que deber tener el tanque de alimentación (9,723 pies³) es el 70% del volumen total del tanque.

70% líquido

30% vacío.

Por lo tanto el volumen del tanque de alimentación es:

$$V_{\text{Tanque}} = \frac{9,723 \text{ pies}^3 * 100\%}{70\%}$$

$$V_{\text{Tanque}} = 13,89 \text{ pies}^3$$

Las dimensiones de este tanque tienen una relación es $\frac{L}{D} = 3$ entonces obtenemos la relación entre longitud y diámetro:

$$V = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot L \quad ; \quad V = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot 3 \cdot D = \frac{3}{4} \pi \cdot D^3$$

$$D = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot V_T}{3 \cdot \pi}} = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot 13,89 \text{ pies}^3}{3 \cdot \pi}} = 1,8 \text{ pies}$$

Longitud del tanque:

$$L = 3 \cdot D$$

$$L = 3 \cdot 1,8 \text{ pies}$$

$$L = 5,4 \text{ pies}$$

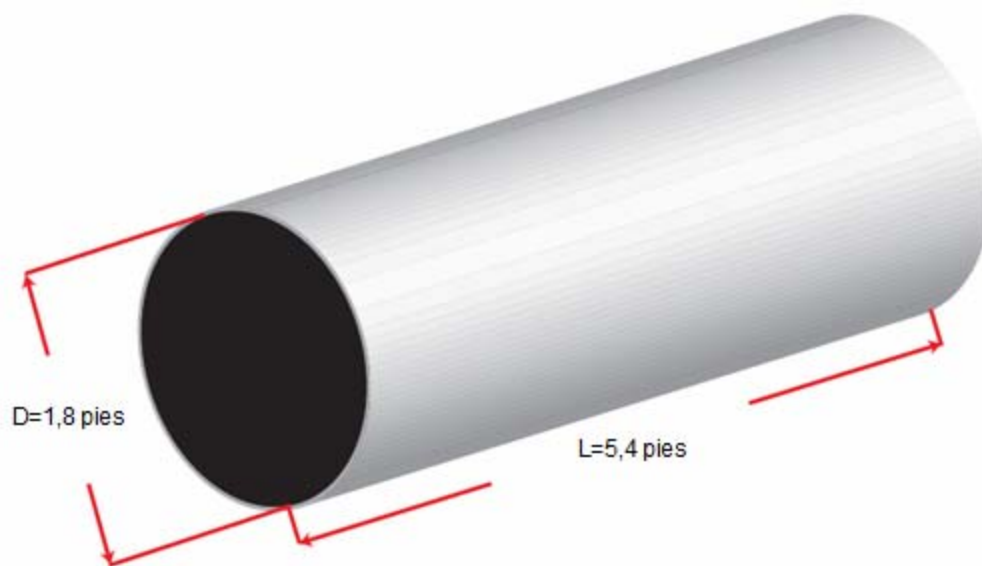


Figura 4.12. Dimensiones del tanque de agua de alimentación a la Caldera

4.3.10. Calculo del combustible necesario para la caldera.

Tabla 4.3 Parámetros generales del combustible:

Combustible	Diesel
Poder calorífico	12956,904BTU/lb
Densidad	57,451lb/pie ³
Temperatura	77°F

4.3.10.1. Calor que necesito para elevar la entalpía del punto 1 al 2:

$$q_{\text{necesario}} = W_s(h_s - h_e) \quad (\text{EC.12})$$

$$W_s = \text{caudal másico del vapor de diseño} = 1821 \text{ lb/h}$$

$$h_s = \text{entalpia de salida} = 1176,4149 \text{ BTU/lb}$$

$$h_e = \text{entalpia de entrada} = 158 \text{ BTU/lb}$$

$$q_{\text{necesario}} = 1821 \text{ lb/hr} (1176,4149 \text{ BTU/lb} - 158 \text{ BTU/lb})$$

$$q_{\text{necesario}} = \mathbf{1854533,533 \text{ BTU/hr}}$$

4.3.10.2. Calor que debe dar el combustible:

$$q_{\text{combustible}} = W_{\text{combustible}} * C_p \quad (\text{EC.13})$$

$$W_{\text{Combustible}} = \frac{q_{\text{Combustible}}}{C_p}$$

Balance de energía calórica:

$$W_s(h_s - h_e) = W_{\text{combustible}} * C_p$$

$$W_{\text{combustible}} = \frac{WS(h_s - h_e)}{C_p}$$

$$W_{\text{combustible}} = \frac{1854533,533 \text{ BTU/hr}}{12956,904 \text{ BTU/lb}}$$

$$W_{\text{combustible}} = 143,131 \text{ lb/hr}$$

$$Q_{\text{combustible}} = 143,131 \text{ lb/hr}$$

$$* 12956,904 \text{ BTU/lb}$$

$$Q_{\text{combustible}} = 1854533,533 \text{ BTU/hr}$$

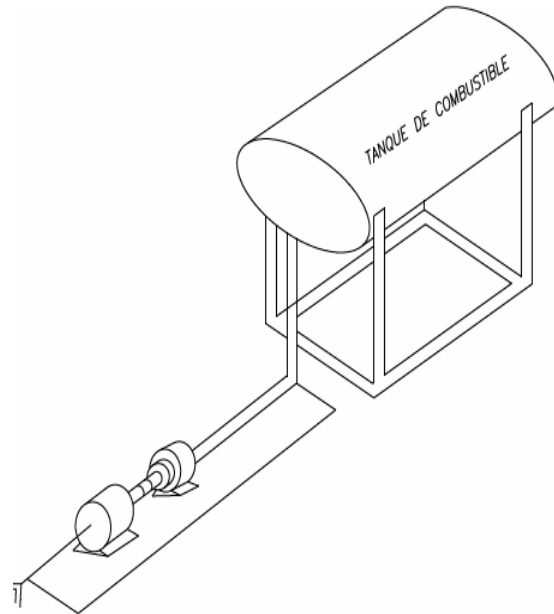


FIGURA 4.13. Tanque de combustible

4.3.10.3. Caudal volumétrico del combustible.

$$Q_{\text{combustible}} = \frac{W_{\text{combustible}}}{\rho_{\text{combustible}}} \quad (\text{EC.13})$$

$$Q_{\text{combustible}} = \frac{143,131 \text{ lbr/h}}{57,451 \text{ lb/pies}^3}$$

$$Q_{\text{combustible}} = 2,491 \text{ pies}^3/\text{h} * 28,3206 \text{ conversión a Litro}$$

$$Q_{\text{combustible}} = 70,54 \text{ L/hr}$$

$$Q_{\text{combustible}} = 70,54 \text{ L/hr} / 3,75 \text{ conversión a galones}$$

$$Q_{\text{combustible}} = 18,54 \text{ GPH}$$

Para tener una certeza de que el combustible pueda cubrir cualquier demanda se coloca un factor de seguridad de entre 200% y 300% por recomendación.

$$q_{\text{combustible}} = 18,54 \text{ GPH} * 2 \quad (\text{EC.14})$$

$$q_{\text{combustible}} = 37,08 \text{ GPH} \approx 40 \text{ GPH}$$

Bomba y quemador con un máximo de 40 GPH, en la bomba no pasa el valor total de 40 GPH sino solamente los 18,54 el resto de combustible regresa, por el ciclo de retroalimentación, de igual manera sucede en el atomizador, lo que no se consume retorna al tanque de diario, mediante la acción de las válvulas selenoides.

4.3.11. Estudio del rendimiento de la caldera

$$\eta = \frac{W_{\text{Diseño}} * (h_s - h_e)}{W_{\text{Combustible}} * \text{PCI}} \quad (\text{EC.15})$$

sustituyendo los valores ya conocidos en la ecuación 15 tenemos:

$$\eta = \frac{1821 \text{ lb/hr} * (1176,41 \text{ BTU/lb} - 158 \text{ BTU/lb})}{143,31 \text{ lb/hr} * 12956,904 \text{ BTU/lb}}$$

$$\eta = 0,9987 = 99,87\%$$

4.3.12. Estudio de la potencia de la bomba de agua.

Tabla 4.3 Parámetros generales de la bomba de agua:

Caudal másico del agua	0,4828 lb/s
Rendimiento bomba	$\eta = 0,75$
Viscosidad del agua	$0,672 \times 10^{-3}$ lb/pies.s

$$\text{Pot}_{\text{Bomba}} = \frac{Q \cdot \rho \cdot hw}{\Pi} \quad (\text{EC.16})$$

$$W_s = Q \cdot \rho \quad (\text{EC.17})$$

Donde:

Q= caudal de la bomba en (pie³/seg)

ρ = densidad del agua en (lb/pie³)

Π =rendimiento de la bomba (%)

hw= trabajo de la bomba (pie)

Sustituyendo la ecuación 17 en 16 tenemos:

$$\text{Pot}_{\text{Bomba}} = \frac{W_s \cdot hw}{\Pi} \quad (\text{EC.18})$$

4.3.13. Estudio del trabajo de la bomba.

- Se aplica bernoulli entre 1 y 2:

$$Z_1 + \frac{U_1^2}{2 \cdot g} + \frac{P_1}{\gamma} + hw = Z_2 + \frac{U_2^2}{2 \cdot g} + \frac{P_2}{\gamma} + hf \quad (\text{EC.19})$$

Z=carga potencial.

U=Velocidad.

P=Presión.

γ =Peso especifico (agua=62,43 lb/pie³).

hf=Perdidas por rozamiento.

- Se desprecia la energía potencial y cinética ya que son pequeñas:

$$Z_1 = Z_2$$

$$hw = \frac{P_2}{\gamma} - \frac{P_1}{\gamma} - hf \quad (\text{EC.20})$$

- Cálculo de las pérdidas:

Partiendo de la ecuación de Darcy:

$$hf = f * \frac{U^2}{2 * g} * \frac{L + \sum L_{\Delta E}}{D} \quad (\text{EC.21})$$

Donde:

L= Tubería de ingreso a la caldera (8,2 pies).

D= Diámetro interno de la tubería (0,132 pies).

$\sum L_{\Delta E}$ = sumatoria de las pérdidas de presión provocadas por las válvulas.

- Las pérdidas ocasionadas por los accesorios se calculan a continuación:
 - 2 x 35pies = 70 pies (2 válvulas, pérdidas en accesorios)
 - 1x 50pies = 50 pies (1 válvulas, check pérdidas en accesorios)

$$\sum L_{\Delta E} = (70 + 50) \text{ pies}$$

$$\sum L_{\Delta E} = 120 \text{ pies}$$

$$L + \sum L_{\Delta E} = (8,2 + 120) \text{ pies}$$

$$L + \sum L_{\Delta E} = 128,2 \text{ pies}$$

- Para determinar el factor de fricción f se determinó número de Reynolds:

$$\frac{U_1^2}{2 * g} = \text{prácticamente despreciable} \approx 0$$

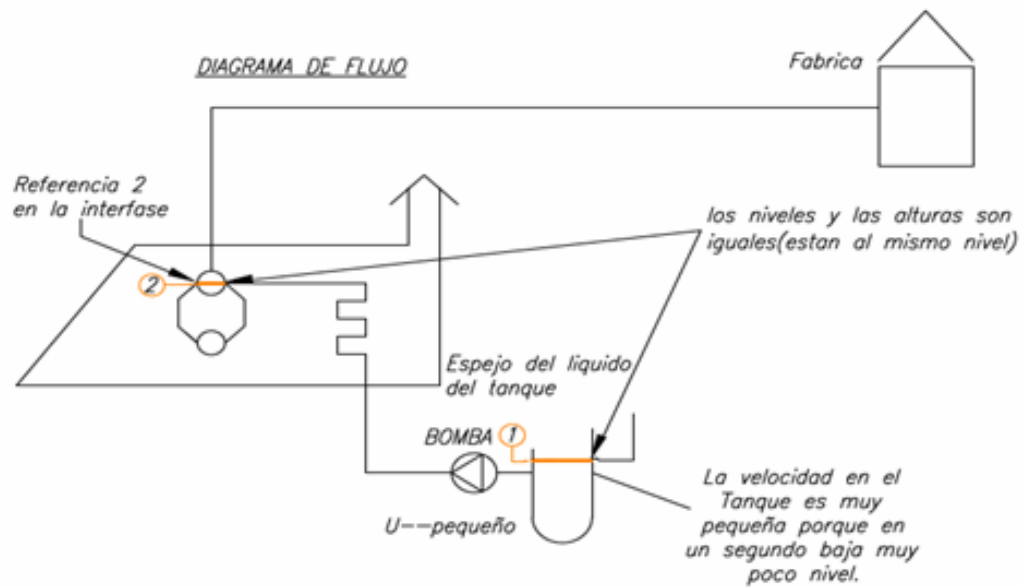


FIGURA 4.14. Diagrama de flujo de vapor.

- Cálculo de velocidad:

$$U = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot D^2} \quad (\text{EC.22})$$

$$Q = \frac{W_s}{\rho}$$

$$Q = \frac{0.4828 \text{ lb/s}}{62.43 \text{ lb/pie}^3}$$

$$U = \frac{4 \cdot 7.73 \times 10^{-3} \text{ pies}^2/\text{s}}{\pi \cdot (0.132 \text{ pies})^2}$$

$$U = 0.565 \text{ lb/s}$$

- Cálculo de Reynolds:

$$Re = \frac{4 \cdot W_s}{\pi \cdot D \cdot \mu} \quad (\text{EC.23})$$

$$Re = \frac{4 \cdot 0.4828 \text{ lb/s}}{\pi \cdot 0.132 \text{ pies} \cdot 0.672 \times 10^{-3} \text{ lb/pie.s}}$$

$$Re = 6933,53$$

- Rugosidad relativa:

Para tuberías galvanizadas se tiene un factor de fricción

$$D = 0,132 \text{ pies} = 1,584''$$

$$e = 0,0018''$$

$$\frac{e}{D} = \frac{0,0018''}{1,584''}$$

$$\frac{e}{D} = 0,00114$$

- Cálculo de f en el diagrama de Moody

Con la rugosidad relativa y el número de Reynolds, se obtiene el factor de fricción en el diagrama de Moody VER anexo 2:

$$f = 0,038$$

- Calculo de las perdidas por rozamiento:

-Sustituyendo en la ecuación 21:

$$hf = f \cdot \frac{U^2}{2 \cdot g} \cdot \frac{L + \sum L_{\Delta E}}{D}$$

$$hf = 0,038 \cdot \frac{(0,565 \text{ lb/s})^2}{2 \cdot 32,185 \text{ pies/seg}^2} \cdot \frac{128,2 \text{ pies}}{0,132 \text{ pies}}$$

$$hf = 0,183 \text{ pies}$$

-Sustituyendo en la ecuación 20:

$$hw = \frac{5 \times 10^4}{1000} - \frac{1 \times 10^4}{1000} - hf$$

$$hw = \frac{10247,81 \text{ lb/pies}^2}{62,43 \text{ lb/pies}^3} - \frac{2049,56 \text{ lb/pies}^2}{62,43 \text{ lb/pies}^3} - 0,183 \text{ pies}$$

$$hw = 131,14 \text{ pies}$$

-Sustituyendo en la ecuación 18:

$$Pot_{Bomba} = \frac{W_s \cdot hw}{\Pi}$$

$$Pot_{Bomba} = \frac{0,4828 \text{ lb/s} \cdot 131,14 \text{ pies}}{0,75}$$

$$Pot_{Bomba} = 84,419 \frac{\text{lbpies}}{\text{seg}} = 0,154 \text{ CV}$$

$$Pot_{Bomba} = 7 \text{ GPM}$$

- Calculo de la potencia Real de la Bomba

Es importante garantizar la potencia que requiere la bomba para alimentar agua al caldero por lo tanto se obtiene una potencia real:

$$Pot_{Real} = Pot_{Bomba} \cdot 200\%$$

$$Pot_{Real} = 7 \text{ GPM} \cdot 200\%$$

$$Pot_{Real} = 13 \text{ GPM}$$

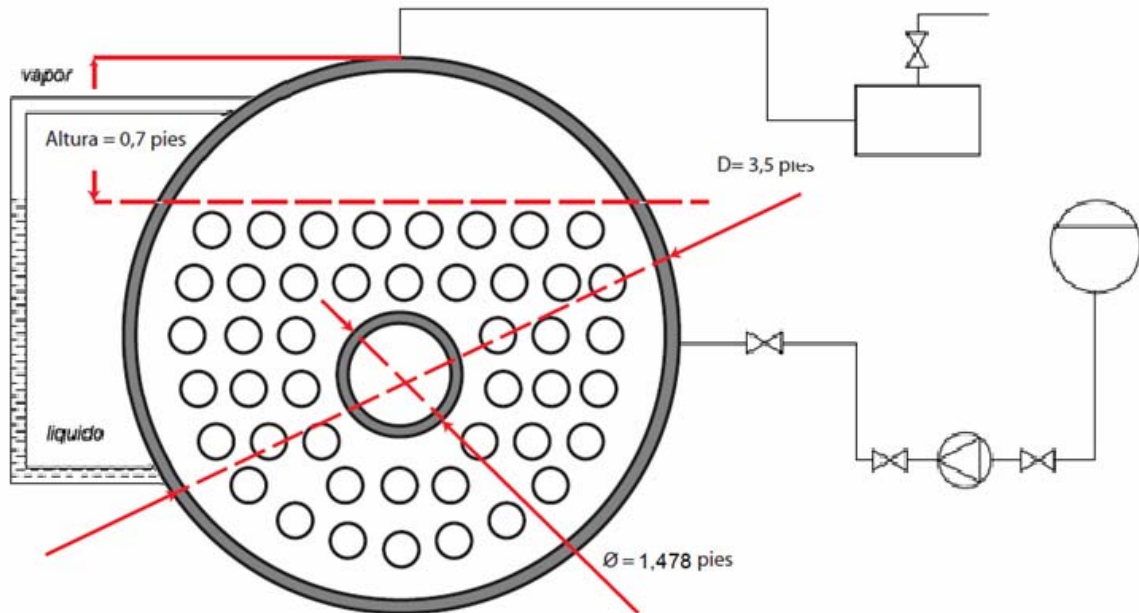


FIGURA 4.15. Ubicación de la bomba y tanque de alimentación de la caldera.

4.3.14. Estudio de los esfuerzos de la caldera dimensionada.

Ahora como medida de sobredimensionamiento es necesario determinar el espesor real y los esfuerzos que se generan en las paredes de la caldera, en virtud de que es un recipiente a presión, y de acuerdo a lo establecido por el código ASME, se tiene lo siguiente:

- Espesor tentativo o teórico del cilindro Caldera : $1-3/8$ "
- Diámetro externo: 42×115 pulg ($9,6$ pies) largo
- Presión de operación: entre 2 y 4 Kg/cm^2 ($28,44$ lb/pulg^2 a $56,88$ lb/pulg^2)

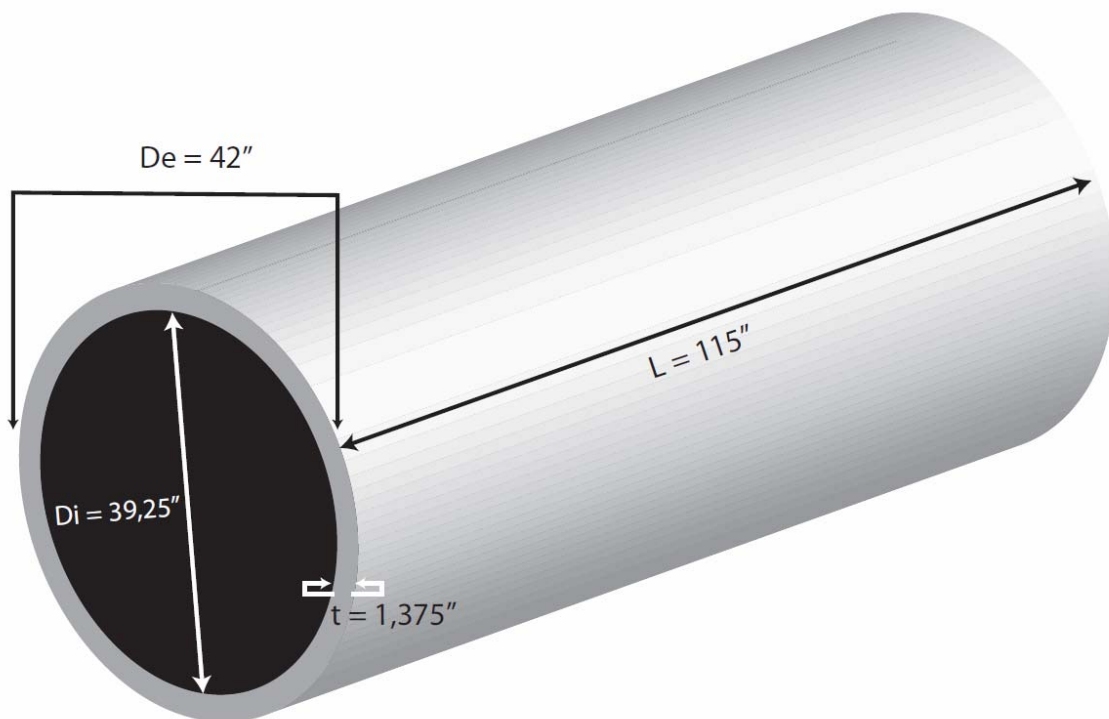


FIGURA 4.16. Dimensiones de la caldera.

Adicionalmente se sabe que el material con el cual será construido dicho separador ASTM 325, cuyo esfuerzo máximo o admisible es de $3458 \text{ Kg/cm}^2 = 49184,52 \text{ lb/pulg}^2$

Dichos parámetros forman parte de los datos correspondientes a la caldera escogida para la investigación y a partir de los cuales se limitó la investigación en este objetivo.

Tomados de los datos anteriores:

$$t = 1,375 \text{ pulg} \quad (1-3/8'')$$

$$D_{\text{externo}} = 42 \text{ pulg} \quad (3,5 \text{ pies})$$

$$P_{i_{\text{operacion}}} = 4 \text{ Kg/cm}^2 \quad (56,88 \text{ lb/pulg}^2)$$

$$P_e = 1,1 \text{ kg/cm}^2 (14,2234 \text{ lb/pulg}^2)$$

En primer lugar se chequea el estado de espesor (grosso o delgado):

$$t_{\text{teórico}} = \frac{D_{\text{externo}} - D_{\text{interno}}}{2} \quad (\text{EC.24})$$

$$D_{\text{externo}} - D_{\text{interno}} = 2 * t_{\text{teórico}} \quad (\text{EC.25})$$

$$D_{\text{interno}} = D_{\text{externo}} - 2 * t_{\text{teórico}} \quad (\text{EC.26})$$

$$D_{\text{interno}} = 42 \text{ pulg} - 2 * 1,375 \text{ pulg} = 39,25 \text{ pulg}$$

$$r_{\text{interno}} = \frac{D_{\text{interno}}}{2} \quad (\text{EC.27})$$

$$r_{\text{interno}} = \frac{39,25 \text{ pulg}}{2}$$

$$r_{\text{interno}} = 19,625 \text{ pulg}$$

Chequeo:

$$\frac{t_{\text{teórico}}}{r_{\text{interno}}} = \frac{1,375 \text{ pulg}}{19,625 \text{ pulg}} = 0,07$$

La relación establece que:

$$\frac{t_{\text{teorico}}}{r_{\text{interno}}} < \frac{1}{20} = 0,050 \quad \text{Pared Delgada}$$

Y

$$\frac{t_{\text{teorico}}}{r_{\text{interno}}} \geq \frac{1}{20} = 0,050 \quad \text{Pared Gruesa}$$

En este Caso:

$$0,07 > \frac{1}{20}$$

Por lo tanto, el recipiente o separador a diseñar, requiere un espesor de pared gruesa.

Calculo de espesor por pared gruesa:

Esfuerzo tangencial Interno:

$$S_{ti} = \frac{P_i \cdot (r_o^2 + r_i^2) - 2 \cdot P_o \cdot r_o^2}{(r_o^2 - r_i^2)} \quad (\text{EC.28})$$

$$S_{ti} = \frac{56,88 \text{ lb/pulg}^2 [(21 \text{ pulg})^2 + (19,625 \text{ pulg})^2] - 2 \cdot 14,2234 \text{ lb/pulg}^2 \cdot (21 \text{ pulg})^2}{(21 \text{ pulg})^2 - (19,625 \text{ pulg})^2}$$

$$S_{ti} = \frac{56,88 \text{ lb/pulg}^2 [441 \text{ pulg}^2 + 385,14 \text{ pulg}^2] - 12545,04 \text{ lb}}{[441 \text{ pulg}^2 - 385,14 \text{ pulg}^2]}$$

$$S_{ti} = 616,653 \text{ lb/pulg}^2$$

Esfuerzo tangencial externo:

$$S_{to} = \frac{-P_o \cdot (r_o^2 + r_i^2) + 2 \cdot P_i \cdot r_i^2}{(r_o^2 - r_i^2)} \quad (\text{EC.29})$$

$$S_{to} = \frac{-14,2234 \text{ lb/pulg}^2 [826,14 \text{ pulg}^2] + 2 \cdot 56,88 \text{ lb/pulg}^2 \cdot (19,625 \text{ pulg})^2}{55,86 \text{ pulg}^2}$$

$$S_{to} = \frac{-11750,519 \text{ lb/pulg}^2 + 43813,597 \text{ lb/pulg}^2}{55,86 \text{ pulg}^2}$$

$$S_{to} = 573,989 \text{ lb/pulg}^2$$

Esfuerzo radial interno:

$$S_{ri} = -P_i \quad (\text{EC.30})$$

$$S_{ri} = -56,88 \text{ lb/pulg}^2$$

Esfuerzo radial externo:

$$S_{ro} = -P_o \quad (\text{EC.31})$$

$$S_{ro} = 14,2234 \text{ lb/pulg}^2$$

Esfuerzo Longitudinal:

$$S_1 = \frac{P_i \cdot r_i^2 + P_o \cdot r_o^2}{r_o^2 - r_i^2} \quad (\text{EC.32})$$

$$S_1 = \frac{56,88 \text{ lb/pulg}^2 \cdot (19,625 \text{ pulg})^2 + 14,2234 \text{ lb/pulg}^2 \cdot (21 \text{ pulg})^2}{55,86 \text{ pulg}^2}$$

$$S_1 = \frac{21906,799 \text{ lb/pulg}^2 + 6272,52 \text{ lb/pulg}^2}{55,86}$$

$$S_1 = 504,46 \text{ lb/pulg}^2$$

Esfuerzo cortante:

$$\tau = \frac{P_i (r_i^2 + r_o^2)}{r_o^2 - r_i^2} \quad (\text{EC.33})$$

$$\tau = \frac{56,88 \text{ lb/pulg}^2 [(19,625 \text{ pulg})^2 + (21 \text{ pulg})^2]}{55,86 \text{ pulg}^2}$$

$$\tau = 841,1226 \text{ lb/pulg}^2$$

Representación Gráfica:

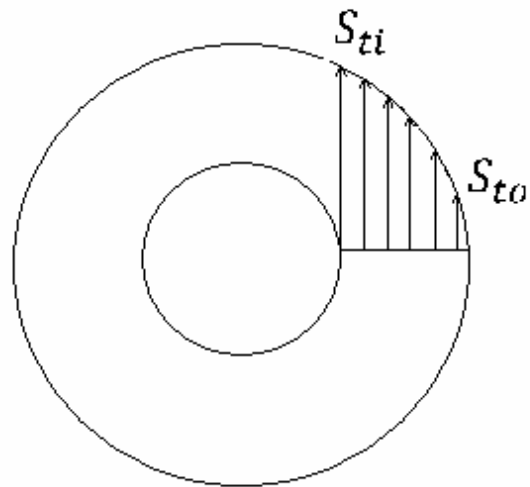


Figura 4.17. Gráfica de esfuerzos tangenciales

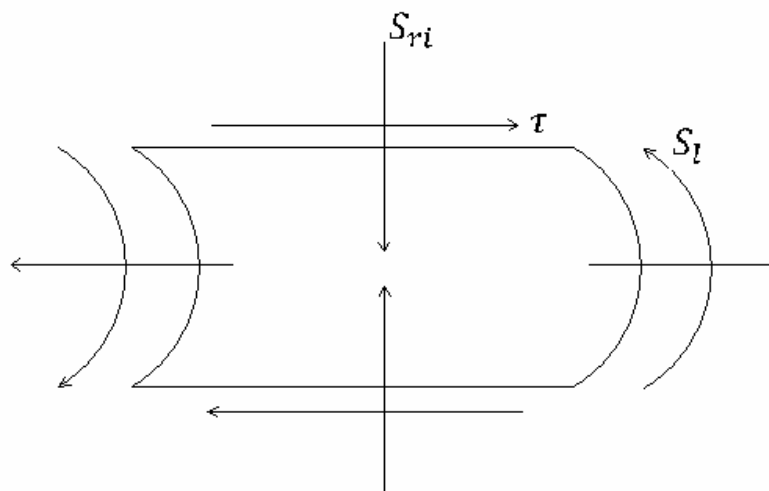


Figura 4.18. Gráfica de esfuerzos radial y longitudinal

Calculo de Espesor:

$$t_{\text{calculo}} = \left[\left(\frac{1}{1 - \frac{F_i}{\sqrt{3} \cdot S_{ti}}} \right)^{1/2} - 1 \right] \cdot r_i \quad (\text{EC.34})$$

$$t_{\text{calculo}} = (19,625 \text{ pulg}) \left[\left(\frac{1}{1 - \frac{56,88 \text{ lb/pulg}^2}{\sqrt{3} \cdot (616,653 \text{ lb/pulg}^2)}} \right)^{1/2} - 1 \right]$$

$$t_{\text{calculo}} = 0,5444 \text{ pulg}$$

factor por correccion 1/8"

$$t_{\text{real}} = 0,5444 \text{ pulg} + 0,125 \text{ pulg}$$

$$t_{\text{real}} = 0,6694 \text{ pulg}$$

Los esfuerzos calculados, están todos dentro del límite máximo permitido para el material de la caldera de $3458 \text{ Kg/cm}^2 = 49184,52 \text{ lb/pulg}^2$, por lo tanto el diseño es satisfactorio tanto térmico como mecánico. De acuerdo a las variables tenidas u calculadas se procedió a realizar una tabla de las características técnicas de la caldera y accesorios diseñada.

Tabla 4.4. Características de diseño de la caldera pirotubular y accesorios diseñada.

Parámetros	Unidades
Tipo de caldera	Pirotubular de 3 pasos
Presión del vapor de salida	56,88 lb/pulg ² (psi)
Presión del agua de alimentación	14,22 lb/pulg ² (psi)
Temperatura del vapor	288,5 °F
Temperatura del agua	158 °F
Potencia de operación	40hp
Potencia de diseño	50hp
Caudal másico de vapor de operación	1433,25 lb/h
Caudal másico de vapor de diseño	1821 lb/h
Eficiencia de la caldera	99,87%
Longitud de los tubos	8,858 pies
Numero de tubos	46
Peso total de los tubos	162,056 lb
Área de calentamiento	250,127 pies ²
hogar	1,478 pies
Altura de acumulación de vapor	0,7 pies
Dimensiones de la caldera	
Diámetro interno	39,25 pulg
Diámetro Externo	45 pulg
Espesor	1,375 pulg
Longitud	125 pulg
Material	Acero ASTM 325
Esfuerzo máximo del material	49184,52lb/pulg ²
Combustible	Diesel
Poder calorífico	12956,904BTU/lb
Densidad	57,451lb/pies ³
Temperatura	77°F
Calor generado	1854533,533 BTU/h
Caudal del combustible	40 GPH
Tanque del agua	
Caudal volumétrico	29,169 pies ³ /h
Volumen(capacidad)	13,89 pies ³
Longitud	5,4 pies
Diámetro	1,8 pies
Bomba de alimentación	
Caudal másico del agua	0,4828 lb/s
Rendimiento bomba	0,75
Potencia de la bomba	13 GPM

4.4. Formulación de una hoja de cálculos, mediante la cual, se estime la capacidad en función de la demanda

Para el logro de este objetivo, se formuló una hoja de cálculos donde el objetivo es La en la determinación de parámetros característicos de la caldera de recuperación de calor pirotubular como:

Potencia de operación con respecto a la generación de vapor a la cual la caldera va operar, la potencia y caudal másico de vapor de diseño las cuales serán las condiciones máximas donde la caldera pueda funcionar sin problemas de operación, los números de tubos, pesos usando el diámetro, longitud y espesor de los tubos como variables conocidas, área de calentamiento de la caldera, la altura de acumulación de vapor y el hogar, el calor necesario para poder transformar el agua en vapor, como también el caudal de combustible que necesitara y el rendimiento de la caldera a la cual va operar. Por último los cálculo de los esfuerzos generados en las paredes de la caldera, la cual se comporta como un recipiente a presión propiamente dicho. Entre los esfuerzos que se determinan a través de la hoja de cálculos, se tienen: esfuerzo tangencial interno, esfuerzo tangencial externo, esfuerzo longitudinal y el esfuerzo cortante. Datos necesarios para la hoja de cálculo:

Potencia y caudal de diseño:

- ✓ Caudal másico de vapor = 1433,25 lb/hr
- ✓ Entalpía del vapor = 1176,41 BTU/hr
- ✓ Entalpía del agua = 158 BTU/hr

Numero y peso de los tubos y otros parámetros:

- ✓ Diámetro de los tubos = 0,19792 pies
- ✓ Longitud de los tubos = 8,8583 pies
- ✓ Espesor de los tubos = 0,01283 pies
- ✓ Diámetro de espejo = 3,5 pies

Calor generado y rendimiento:

- ✓ $C_p = 12956,904 \text{ BTU/lb}$
- ✓ Densidad = $57,451 \text{ lb/pies}^3$

Cálculos de esfuerzos y dimensiones de la caldera:

- ✓ Presión interna = $56,88 \text{ lb/pulg}^2$
- ✓ Presión externa = $14,2234 \text{ lb/pulg}^2$)
- ✓ Radio externo = 42 pulg
- ✓ Radio interno = 39,25 pulg

Se identifican con color amarillo los datos y los parámetros calculados o a calcular se resaltan en color azul. A continuación se muestran las hojas de cálculo referidas:

ENTALPIA DEL AGUA (BTU/LB)	ENTALPIA DEL VAPOR(BTU/LB)	ENTALPIA DE VAPORIZACION (BTU/LB)	CAUDAL MASICO DEL VAPOR DE OPERACION (LB/HR)	POTENCIA DE OPERACION (HP)	POTENCIA DE DISEÑO (HP)	CAUDAL MASICO DEL VAPOR DE DISEÑO (LB/HR)		
158	1176,41	1074,82	1433,25	39,36314331	47,23577198	1820,548207		
Longitud tubo (pies)	Diámetro tubo,(pies)	Espesor tubo,(pies)	Diámetro espejo (pies)	Numero de tubos	Peso total de los tubos (lb)	Área de calentamiento (pies ²)	Altura de vapor en la caldera (pies)	Área del hogar(pies)
8,85	0,197	0,01283	3,5	43,15935006	1364,121994	236,4053682	0,7	1,4875
Poder calorífico del combustible (BTU/lb)	Calor Generado (BTU/hr)	Numero de tubos	Caudal de combustible (GPM)	Rendimiento				
12956,904	57,451	1854064,5	37,62072693	100				
PRESION INTERNA(LB/PULG ²)	PRESION EXTERNA(LB/PULG ²)	RADIO EXTERNO(PULG)	RADIO INTERNO(PULG)	ESFUERZO TANGENCIAL INTERNO(LB/PULG ²)	ESFUERZO TANGENCIAL EXTERNO(LB/PULG ²)	ESFUERZO LONGITUDINAL(LB/PULG ²)	ESFUERZO CORTANTE(LB/PULG ²)	
56,88	14,22	42	39,25	616,653	574,00	504,47	841,24	

Figura 4.19. Hoja de cálculo en Excel.

4.5. Análisis de las fallas que se presentan comúnmente en una caldera recuperadora de calor y en especial en una planta termoeléctrica

Para el logro de este objetivo, se elaboraron los diagramas causa efecto o espigas de pescado, y unas tablas de análisis de modos y efectos e fallas, AMEF, y considerando las causas con mayor frecuencia, las cuales son realmente las que generan paradas de los sistemas de vapor. Se basa este análisis, en las fallas comunes presentadas en plantas termoeléctricas y calderas recuperadoras, las cuales por la revisión bibliográfica. Son las siguientes:

- ✓ Bomba de alimentación trancada.
- ✓ Bomba de alimentación con fuga.
- ✓ Economizador sucio.
- ✓ Válvula de purga rota.
- ✓ Válvula de salida no abre.

A continuación se muestra una tabla de registro de fallas comunes en calderas recuperadoras y en plantas termoeléctricas, como referencia para logra este objetivo.

Tabla 4.5. Registro de fallas

DESCRIPCION	FRECUENCIA
Bomba de alimentación trancada	12
Soplador atascado	4
Válvula de combustible cerrada	5
Ventilador de tiro atascado	5
Fuga en tubos curvados	6
Corrosión erosiva en tuberías	7
Aislamiento roto	3
Economizador sucio	10
Válvula de purga rota	10
Válvula de salida no abre	8
Bomba de alimentación con fuga	14
Escape de vapor en hogar	2
Motor ventilador no arranca	2
Toma muestra tapado	2
Arranque de producción retrasado	2

En base a estas fallas suministradas por el registro encontrado en revisión bibliográfica relacionada con fallas en plantas termoeléctricas, se elaboraron los cuadros AMEF y los diagramas causa efecto correspondientes que aparecen a continuación:

TABLA 4.6. AMEF 1, de bomba de alimentación a calderas.

Análisis del modo y efecto de la falla (AMEF) Para procesos de vapor/producto de generación de vapor							
Nombre del equipo		Bomba de alimentación a la caldera					
Entrada clave del proceso	Modo de falla potencial	Efecto de falla potencial	Causas potenciales	Controles vigentes	Acciones recomendadas	Responsable	Acciones tomadas
Aranque	No arranca	Falla en generación de vapor	No hay tención en línea	Ninguno	Revisar acometidas y componentes	Personal de mantenimiento eléctrico o instrumentación	Se revisan contactos y acometidas
Impulsión de agua precalentada	Poca presión	Baja producción de vapor	Impulsor desgastado, fugas en el sello mecánico	Ninguno	Revisar posibles fugas y revisar condiciones del impulsor	Personal de mantenimiento mecánico	Se cambia impulsor y sello
Fugas constantes en sello mecánicos	Botes constantes en área	Vibraciones excesivo en la bomba	Cara estacionaria de sellos, rota,	Ninguno	Revisar condición actual de sellos y de anclaje de la bomba	Personal de mantenimiento mecánico	Se cambia los sellos, se alinea nuevamente la bomba, se coloca un perno de anclaje si estaba flojo, se ajusto acople a motor
Ruido y vibraciones excesivas	Fugas en conexiones y paredes de bomba	Fuga en sello, excesivo ruido, parada de motor, parada de bomba, bomba trabada	Desalineación en eje, soldura de acople bomba-motor, pernos de anclaje	Ninguno	Revisar elementos de ajuste y anclaje de bomba y sellos	Personal de mantenimiento mecánico	Se revisaron acoples, sellos, anclajes y se cambio pernos de anclaje

TABLA 4.7. AMEF 2, de economizador.

Análisis del modo y efecto de la falla (AMEF) Para procesos de vapor/producto de generación de vapor							
Nombre del equipo		Economizador					
Entrada clave del proceso	Modo de falla potencial	Efecto de falla potencial	Causas potenciales	Controles vigentes	Acciones recomendadas	Responsable	Acciones tomadas
Fugas	Fugas en tubería	Tubos y paredes de tanques corroídas	Deterioro de tanque y tuberías a traves del tiempo	Ninguno	Revisar tubo y paredes del tanque	Personal de mantenimiento mecánico	Se midió espesor de pared en tubos y tanques economizador, se quito recubrimiento y se pintaron y aislaron nuevamente
Temperatura	No se conserva la temperatura del agua	Calidad del vapor no es adecuada en términos termodinámicos para los procesos requeridos	Escaso aislamiento o rotura del mismo	Ninguno	Revisar paredes de tanques y verificar condición de aislamiento	Personal de mantenimiento mecánico	Se verifico ausencia considerable de aislamiento en tanque y se coloco recubrimiento nuevo en el mismo

TABLA 4.8. AMEF 3, válvula de seguridad en caldera.

Análisis del modo y efecto de la falla (AMEF)							
Para procesos de vapor/producto de generación de vapor							
Nombre del equipo		Válvula de seguridad					
Entrada clave del proceso	Modo de falla potencial	Efecto de falla potencial	Causas potenciales	Controles vigentes	Acciones recomendadas	Responsable	Acciones tomadas
Abertura	No abre totalmente	Vapor no llega a tiempo y con el caudal requerido	Asiento pegado, obstruido, sucio, mal tratamiento de agua de alimentación, control e instrumentación defectuosa	Ninguno	Revisar controles de instrumentación y control en válvula de seguridad, revisar, limpiar asiento de válvula, cambiar si es necesario	Personal de mantenimiento mecánico o de instrumentación	Se ajustaron dispositivos de control de instrumentación para válvulas de control, se combinaron aros de teflon en asientos de válvula

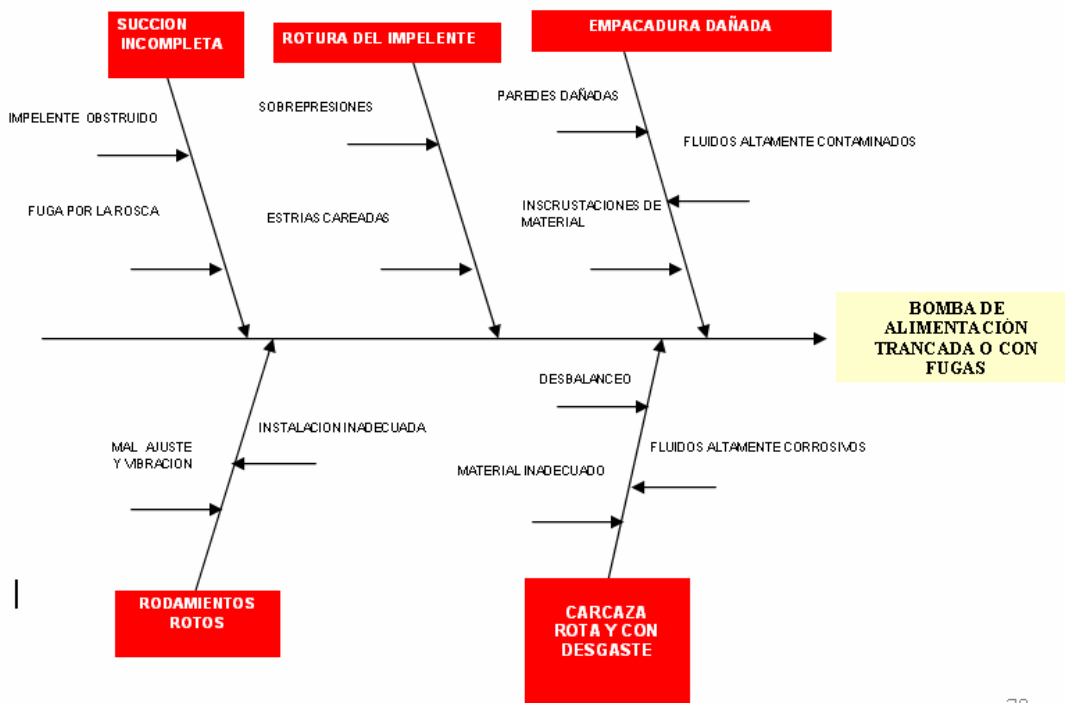


Figura 4.20. Diagrama causa-efecto bomba de alimentación

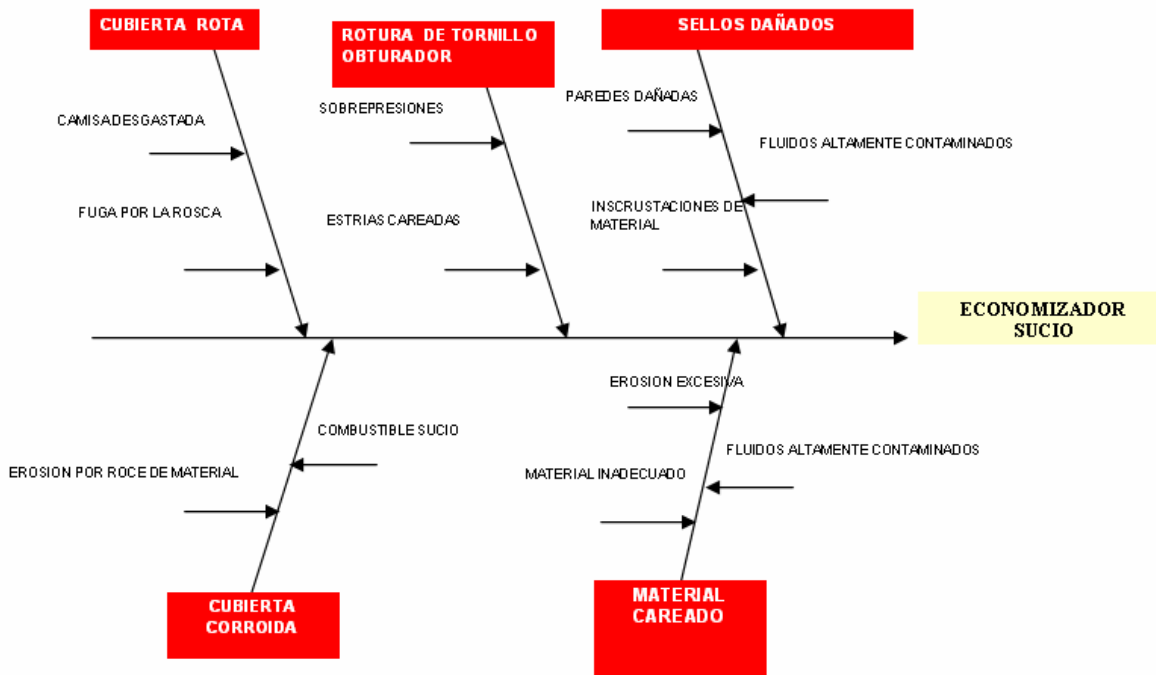


Figura 4.21. Diagrama causa-efecto economizador

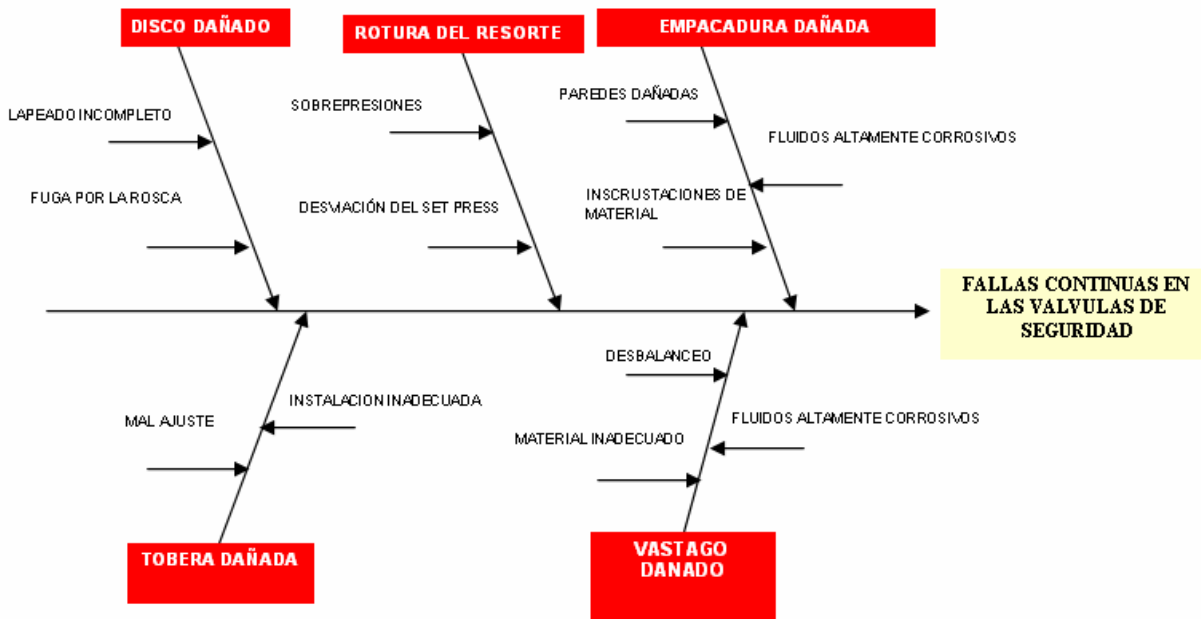


Figura 4.22. Diagrama causa-efecto válvulas de seguridad

4.6. Recomendación de la aplicación de un plan de mantenimiento preventivo para el aprovechamiento de la vida útil y operativa de la caldera recuperadora de calor diseñada

Para el logro de este objetivo, sencillamente, se tomó una recomendación de mantenimiento de calderas de vapor por revisión bibliografía donde se muestran acá una serie de actividades indicadas para preservar la vida útil de un equipo de esta naturaleza. Debido a que son equipos a los cuales no se les ha practicado algún tipo de mantenimiento en otra ocasión, y que las fallas encontradas y analizadas se basan en causas que pudieron ser evitadas con mantenimiento preventivo, se tomó simplemente la recomendación del fabricante como sigue:

MANTENIMIENTO DIARIO.

1. Limpiar las boquillas del quemador de la caldera.
2. Comprobar el nivel de lubricantes para el compresor en el tanque aire-aceite. Debe de estar a 1/2 de nivel, esto es, dentro del tercio medio y si está más bajo, ponerlo a nivel.
3. Purgar la caldera por lo menos cada ocho horas de trabajo, tanto de la purga de fondo como de sus columnas de control de nivel. Esto se hace subiendo el nivel de agua a 1/2 y purgando hasta que arranque la Bomba de alimentación. Recomendamos consultar a su experto en tratamiento de aguas al Respecto y es muy importante se sigan sus instrucciones, así como también colocar las instrucciones que sobre purgas de fondo y control de nivel, envía la fabrica con el manual de operación. Lea y siga las instrucciones de la placa de advertencia que aparece a un costado de la Caldera.

4. Comprobar así mismo que la presión indicada por los manómetros de entrada al combustible, la presión en la válvula medidora y la presión de salida de combustible, son las fijadas en su Manual de Operación.
5. Comprobar si la presión de aire de atomización es la correcta.
6. Comprobar y registrar la temperatura de los gases de la chimenea.
7. Tomar análisis de gases de combustión y registrar en bitácora.

MANTENIMIENTO CADA TERCER DIA.

1. Comprobar que la trampa del calentador de vapor opera correctamente.
2. Limpiar los filtros de combustible que están en la succión de la bomba.

MANTENIMIENTO CADA OCHO DIAS.

1. Comprobar que no haya fugas de gases ni de aire en las juntas de ambas tapas y mirilla trasera.
2. Comprobar la tensión de la banda al compresor.
3. Limpiar el filtro de lubricante, que está pegado al compresor.
4. Lavar los filtros, tanto el de entrada a la bomba como el de entrada de agua al tanque de condensados.
5. Limpiar el electrodo del piloto de gas.
6. Comprobar que los interruptores termostáticos del calentador de combustible operen a la temperatura a que fueron calibrados al punto requerido al hacer la puesta en marcha. Consulte su Manual de Operación.
7. Inspeccione la prensa estopas de la bomba de alimentación de agua.

MANTENIMIENTO QUINCENAL.

1. Hacer limpieza de todos los filtros de agua, aceite combustible y aceite lubricante.

2. Probar la operación por falla de flama.
3. Revisión a las condiciones del quemador, presión, temperatura, etc.
4. Revisar los niveles de entrada y paro de la bomba, haciendo uso de las válvulas de purga de fondo de la caldera.
5. Asegúrese que la foto-celda este limpia, así como el tubo en donde se encuentra colocada.

MANTENIMIENTO MENSUAL.

1. Comprobar que los niveles del agua con los indicados:
 - 58 mm (2-1/4") de nivel máximo.
 - 45 mm (1-3/4") arranque de la bomba.
 - 32 mm. (1- 1/4") corte por bajo nivel.
2. Comprobar el nivel bajo bajando el interruptor de la bomba de alimentación. El agua al evaporarse irá disminuyendo el nivel y si al llegar a 32 mm (1- 1/4") no se corta el por bajo nivel, hay que parar inmediatamente la caldera e inspeccionar el bulbo de mercurio así como también asegurarse de un correcto funcionamiento del flotador y que la columna esta en exenta de lodos o acumulaciones.
3. Comprobar el voltaje y cargas que toman los motores.

MANTENIMIENTO TRIMESTRAL.

1. Observar la temperatura del termómetro de salida de gases de la chimenea de la caldera, cuando tenga 80°C por arriba de la temperatura del vapor saturado es indicativo que la caldera está hollinada y hay que proceder a limpiarla.

2. Es conveniente también que se destapen varias tortugas ó registros de en medio y de la parte de abajo, para ver el estado de limpieza interior por el lado del agua. Se contacta al técnico en tratamiento de agua.
3. Cada vez que se desholline es conveniente para la mejor conservación del refractario, darle una lechada con mortero refractario, tanto a la tapa trasera como al refractario del hogar.
4. Tirar ligeramente de las palancas de las válvulas de seguridad para que escapen.

MANTENIMIENTO SEMESTRAL.

1. Comprobar el nivel de aceite del reductor de velocidad de la bomba de combustible.
2. Revisar los empaques de la prensa-estopa de la bomba de alimentación de agua. En caso de encontrarse secos, cámbiense por nuevos.
3. Efectúen Limpieza general a los contactos del programador de flama y los arrancadores con un trozo de género limpio, humedecido con tetracloruro de carbono.
4. No después de tres meses de efectuada la puesta en marcha inicial de la caldera y después, según las condiciones lo requieran, la caldera deberá ser enfriada y secadas las cubiertas quitadas y el interior debe ser lavado con agua a presión. Tubos y espejos deberán ser inspeccionados al mismo tiempo para buscar incrustaciones. La efectividad del tratamiento de agua y el porcentaje de agua de reposición requerida, determinarán los siguientes períodos de limpieza. El servicio de su experto en tratamiento de agua, deberá incluir inspecciones periódicas al interior de la caldera, así como análisis del agua.
5. Inspeccione los tubos fluxes por el lado del hollín y de ser necesario limpiar.

6. Inspeccione el material refractario del horno y la puerta trasera.
7. Limpie las grietas y saque el material refractario que se haya desprendido. Recubra el mismo con un cemento refractario de fraguado al aire; el período de este recubrimiento varía con el tipo de carga y operación de la caldera y deber ser determinado por el operador al abrir las puertas para hacer limpieza de hollín.
8. Revise sus bandas de transmisión, de la tensión apropiada.
9. Es conveniente lavar la caldera interiormente. Para hacer esto, se quita la reducción del manómetro que va en la tee a la salida de la bomba de alimentación de agua, se coloca ahí una reducción al tamaño de la manguera que se va a utilizar. Antes de hacer todo esto, se enfría la caldera, bajándola de presión y haciendo circular el agua, purgándola para que entre agua fría, así, hasta que esté totalmente fría. La operación de enfriamiento deberá hacerse con lapsos de reposo de 20 a 25 minutos para que el enfriamiento no sea brusco y dañe los fluxes. Luego se vacía totalmente de agua y se quitan todas las tortugas. Ya habiendo puesto la manguera en la bomba, se cierra la válvula de entrada de agua a la caldera y al poner a funcionar la bomba, sale agua por la manguera a bastante presión. Con este chorro de agua se lava la caldera interiormente, se mete la manguera por todos los registros de mano hasta que quede bien limpia. Se tapa, limpiando perfectamente las tortugas y el asiento de las mismas en la caldera.
10. Comprobar la limpieza de las columnas de control y de las entradas del agua de la bomba de alimentación y el inyector.
11. Se refrescan las cuerdas al tornillo de las tortugas y se les coloca grafito con aceite para que no se oxiden.

12. Destapar todas las cruces y comprobar que estén limpias. Efectuar mantenimiento cada seis meses cuando menos.

MANTENIMIENTO DE CALDERA ANUAL

1. Limpiar el calentador eléctrico y el calentador de vapor para combustible, así como asentar la válvula de alivio y las reguladoras de presión.
2. Revisar el estado en que se encuentran todas las válvulas de la caldera, asentarlas si es necesario y si no se pueden asentar, cambiarlas por otras nuevas.
3. Re-engrasar los baleros de la bomba de agua de combustible.
4. Re-lubricar los baleros sellados de las transmisiones ó motores que tengan este tipo de baleros. Repónganse los sellos cuidadosamente, reemplácense los baleros defectuosos ó los que se tenga duda.
5. Vacíe y lave con solvente apropiado el tanque aire-aceite , así como todas las tuberías de aire y aceite que de él salgan, procurando que al reponerlas, queden debidamente apretadas.
6. Cámbiese el lubricante por aceite nuevo SAE 10.
7. Desarme e inspeccione las válvulas de seguridad, así como las tuberías de drenaje, y luego ensamblar.

CONCLUSIONES

Luego de haber finalizado la investigación, se formularon las siguientes conclusiones:

1. Se puede decir que la caldera recuperadora de calor, reutiliza gases de escape de una máquina térmica por lo general una turbina así genera vapor para la generación eléctrica.
2. Luego de haber calculado los parámetros básicos de diseño como potencia, potencia de diseño, rendimiento y otros de importancia para el funcionamiento de la caldera, se puede afirmar que están acordes a las normas establecidas para el tamaño o dimensión calculada de la misma en cuanto a su área de calefacción.
3. Los esfuerzos generados en las paredes del cilindro(caldera), están por debajo del máximo a soportar por el material, $49184,52\text{lb/pulg}^2$, lo cual nos indica que el diseño es satisfactorio y que la caldera diseñada soportará las presiones de trabajo establecidas como parámetros de operación.
4. El valor real del flujo másico de operación escogido, $W_s=1433,25\text{ lb/h}$, es satisfactorio desde el punto de vista del diseño térmico de la caldera; ya que no sobrepasa el caudal másico del vapor de diseño de la caldera.
5. La hoja de cálculo es una herramienta que ayuda a la obtención rápida y simplificada de los parámetros necesarios para el diseño y posterior instalación

de un equipo generador de vapor o recuperador de calor como el utilizado en esta investigación.

6. El análisis de fallas es necesario para conocer las fallas comunes y sus causas que se presentan en los equipos generadores o recuperadores de calor.
7. Un plan de mantenimiento preventivo es necesario para el aprovechamiento de la vida útil de la caldera.
8. Es importante esta investigación, desde el punto de vista del rendimiento y producción de vapor de una caldera, porque a través de ella podemos determinar cuánto puedo aumentar la producción o cuanto puedo recuperar para aumentar el rendimiento en la generación de energía eléctrica.

RECOMENDACIONES

Así mismo es importante recomendar acciones que mejoren la investigación, como :

1. Establecer la hoja de cálculo como herramienta prioritaria en todo proyecto térmico o mecánico, con el propósito de conocer valores de producción, variando condiciones y/o parámetros de operación de los cuales depende el proceso.
2. Un plan de mantenimiento siempre es recomendado como un objetivo opcional en cualquier investigación de diseño, porque garantiza que el equipo, sistema o

elemento diseñado, mantendrá continua su operación a través del tiempo, y así sus equipos estarán disponibles y tendrán una confiabilidad operacional dentro de los parámetros normales de funcionamiento.

3. Aplicar mantenimiento rápida y efectivamente a cualquier equipo o sistema de vapor, para preservar la vida útil de elementos como economizador y bombas de alimentación, que son importantes dentro del diagrama de producción de una caldera.
4. Continuar con esta investigación desde otro punto de vista para seguir mejorando parámetros de producción y poder garantizar una generación acorde a la demanda exigida.
5. Recuperar gases de escape para generar vapor o calor, es una práctica positiva en función de la ganancia que se presenta como parámetro de producción y disminución de costos de generación, además de cuidar el ambiente en función de que no habrá gases que escapen a la atmósfera.

BIBLIOGRAFÍA

- 1.- MESNY, Marcelo. **Generación de vapor**. Ediciones marymar. Tercera edición. Número de páginas 1752. México, 199.
- 2.- MEGYESY, Johan. **Recipientes a Presión**. Editorial Limusa. Segunda Edición. Número de páginas 548. México, 2000.
- 3.- URCELAY, Ramón, (2000). **Manual de Operaciones de Calderas de Vapor..** El Tigre, 1990.
- 4.- BABCOCK, Wilcox. **Generación y Recuperación de calor**. Editorial Reverté. Primera edición. Número de páginas 766. Madrid, 1990.
- 5.- SINTAS COLL, J., **Control de Generadores de Vapor**, Editorial Reverté. Segunda edición. Número de páginas 889. Barcelona, 2000.
- 6.- BASCAKOV, Paul. **Termotécnia**. Editorial MacGrawHill. Primera edición. Número de páginas 565. México, 1989.
- 7.- GOODING, Nestor. **Operaciones Unitarias II**: Santafé de Bogotá; Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ingeniería. 1998. Pág. 109-137.
- 8.- SHIELD, Carl. **Calderas**: Tipos, Características y sus funciones. 1ed. México: Continental, 198. Pág. 20-72

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

TÍTULO	PROPUESTA DEL DISEÑO CONCEPTUAL Y BÁSICO DE UNA CALDERA DE RECUPERACIÓN DE CALOR PARA LA GENERACIÓN EN UNA PLANTA TERMOELÉCTRICA
SUBTÍTULO	

AUTOR (ES):

APELLIDOS Y NOMBRES	CÓDIGO CULAC / E MAIL
Roi Andre Fernández Salinas	CVLAC: 17.732.860 E-MAIL: Roifer86@hotmail.com
Francis Payares	CVLAC: 17.707.645 E-MAIL: francispayares472@hotmail.com

PALÁBRAS O FRASES CLAVES:

Termo Eléctricas

Caldera Piro tubular

Hogar

Economizador

Sobrecalentador

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

ÁREA	SUBÁREA
Ingeniería y Ciencias Aplicadas	Ingeniería Química

RESUMEN (ABSTRACT):

El objetivo de este trabajo es el diseño de una caldera de recuperación de calor(caldera de vapor). Se recopiló información referente al proceso con el cual opera y las partes las cuales conforman a la caldera diseñada. Se elaboró una serie de cálculos teniendo como valores iniciales el caudal de operación 1433,25 lb/h, temperatura y presiones de entrada y salida de la caldera de los cuales son claves para determinar los parámetros característicos de la caldera, como la potencia de operación que dio como resultado 40hp, potencia de diseño 50hp, rendimiento de la caldera, calor generado y necesario para la generación de vapor y otros parámetros necesarios para los cálculos, también se realizó el dimensionamiento de la caldera, tubos, hogar, etc, también se hizo los cálculos de la potencia de la bomba de agua para alimentar a la caldera y su tanque donde se encuentra almacenada. Posteriormente se realizó una hoja de cálculo por Excel la cual además de facilitar los cálculos es de gran uso para obtener los parámetros necesarios de forma sencilla y rápida, teniendo valores que son constantes para el diseño.

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

CONTRIBUIDORES:

APELLIDOS Y NOMBRES	ROL / CÓDIGO CVLAC / E_MAIL				
José Rondón	ROL	CA	AS(X)	TU	JU(X)
	CVLAC:	8328657			
	E_MAIL	rondonjj@gmail.com			
	ROL	CA	AS	TU	JU
	CVLAC:				
	E_MAIL				
	ROL	CA	AS	TU	JU
	CVLAC:				
	E_MAIL				
	ROL	CA	AS	TU	JU
	CVLAC:				
	E_MAIL				

FECHA DE DISCUSIÓN Y APROBACIÓN:

2011	04	06
AÑO	MES	DÍA

LENGUAJE. SPA

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

ARCHIVO (S):

NOMBRE DE ARCHIVO	TIPO MIME
Tesis.Propuesta.Caldera.Generación.doc	Application/ msword

CARACTERES EN LOS NOMBRES DE LOS ARCHIVOS: A B C D E F G H I J
K L M N O P Q R S T U V W X Y Z. a b c d e f g h i j k l m n o p q r s t u v w x y z.
0 1 2 3 4 5 6 7 8 9.

ALCANCE

ESPACIAL: Propuesta del Diseño Conceptual y Básico de una Caldera de Recuperación de Calor para la Generación en una Planta Termoeléctrica

TEMPORAL: Seis meses

TÍTULO O GRADO ASOCIADO CON EL TRABAJO:

Ingeniero Químico

NIVEL ASOCIADO CON EL TRABAJO:

Pregrado

ÁREA DE ESTUDIO:

Departamento de Ingeniería Química

INSTITUCIÓN:

Universidad de Oriente. Núcleo de Anzoátegui

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

DERECHOS

De acuerdo al artículo 41 del Reglamento de Trabajo de Grado:

“Los Trabajos de Grado son exclusiva propiedad de la Universidad y solo podrán ser utilizados a otros fines con el consentimiento del Consejo de Núcleo respectivo, quien lo participará al Consejo Universitario”

Roi Andre Fernández Salinas

AUTOR

Francis Payares

AUTOR

Ing. José Rondón

TUTOR / JURADO

Ing. Yraima Salas

POR LA SUBCOMISIÓN DE TESIS