

**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SANTA  
FACULTAD DE INGENIERIA  
ESCUELA ACADEMICO PROFESIONAL DE INGENIERIA EN ENERGIA**



**“INFLUENCIA DE LA PRESION DE OPERACIÓN  
EN LAS CARACTERISTICAS DE DISEÑO DE UN  
CALDERO PIROTUBULAR DE 2 TON/HORA DE  
VAPOR SATURADO”**

**Tesis para Optar el Título de Ingeniero en Energía**

**AUTORES :**

Bachiller Egresado: Deivy Alexander López Contreras

Bachiller Egresado: Cesar Augusto Corpus Saldaña

**ASESOR :**

Mg. Robert Fabián Guevara Chinchayán

**NUEVO CHIMBOTE, ENERO DEL 2015**



**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SANTA**

**FACULTAD DE INGENIERIA**

**ESCUELA ACADEMICA PROFESIONAL EN ENERGIA**

**CARTA DE CONFORMIDAD DEL ASESOR**

La presente Tesis ha sido revisada y desarrollada en cumplimiento del objetivo propuesto y reúne las condiciones formales y metodológicas, estando encuadrado dentro de las áreas y líneas de investigación conforme al reglamento general para obtener el título profesional en la universidad nacional del santa (R: D: N° 471-2002-CU-R-UNS) de acuerdo a la denominación siguiente:

**TESIS PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE INGENIERO EN  
ENERGIA**

**“INFLUENCIA DE LA PRESION DE OPERACIÓN EN LAS  
CARACTERISTICAS DE DISEÑO DE UN CALDERO PIROTUBULAR  
DE 2 TON/HORA DE VAPOR SATURADO”**

TESISTAS:

Bachiller Egresado: Deivy Alexander López Contreras

Bachiller Egresado: Cesar Augusto Corpus Saldaña

.....  
MG. ROBERT GUEVARA CHINCHAYAN  
ASESOR

**APROBADO POR:**

---

**MG. GILMER LUJAN GUEVARA**  
**PRESIDENTE**

---

**ING. NELVER ESCALANTE ESPINOZA**  
**INTEGRANTE**

---

**MG. ROBERT GUEVARA CHINCHAYAN**  
**INTEGRANTE**

**DEDICATORIA: DEIVY LOPEZ**

*A nuestros queridos Padres por el amor y cariño  
de todos los días y su  
ejemplo en dedicación y trabajo.*

*A mis hermanos y mi familia  
Para los cuales son todos mis esfuerzos  
Para ser cada día mejor*

*A Dios por su apoyo infinito y por ser nuestro guía  
En nuestra carrera y por ser la luz en nuestra vida.*

**DEDICATORIA: CESAR CORPUS**

*A nuestros queridos Padres por el esfuerzo  
Cariño , dedicación de todos los días y su  
afán de siempre querer lo mejor para nosotros.*

*A Dios por su apoyo infinito y por ser nuestro guía  
En nuestra carrera y por ser la luz en nuestra vida.*

## **RECONOCIMIENTO**

A nuestros colegas y amigos  
Que me acompañaron  
Durante mi estancia en la Escuela de  
Energía  
Por su compañerismo y camaradería

A los Profesores de la  
EAP de Ingeniería en Energía  
Y a mi Asesor Mg Robert Guevara  
Por el apoyo desinteresado  
Y sus enseñanzas durante  
Nuestra vida universitaria.

DEIVY LOPEZ

## **RECONOCIMIENTO**

A nuestros colegas y amigos  
De la EAP de Ingeniería en Energía  
Siempre los recordare por esos  
Gratos momentos de compañerismo y  
Estudio.

A los Profesores de la  
EAP de Ingeniería en Energía  
Y a mi Asesor Mg Robert Guevara  
Por el apoyo desinteresado  
Y sus enseñanzas durante  
Nuestra vida universitaria.

CESAR CORPUS

## INDICE

INDICE

RESUMEN

ABSTRACT

CAPITULO I: INTRODUCCION	1
1.1 Realidad Problemática	2
1.2 Antecedentes	2
1.3 Descripción del lugar donde se ha realizado el estudio	4
1.4 Justificación	5
1.5 Hipótesis	6
1.6 Objetivos	6
CAPITULO II: MARCO TEORICO	7
2.1 Generadores de vapor	8
2.2 Criterios energéticos de diseño	36
2.3 Esfuerzos mecánicos para el diseño	44
2.4 Dimensionamiento de sistemas auxiliares	50
2.5 Criterios de diseño y fabricación	59
2.6 Analisis económico	66
CAPITULO III: MATERIALES Y METODOS	69
3.1 Materiales	70
3.2 Método de Investigación	72

CAPITULO IV: CALCULOS Y DISCUSION DE RESULTADOS	74
4.1 Diseño Energético	75
4.2 Diseño Mecánico	83
4.3 Aspectos constructivos	89
4.4 Componentes Auxiliares	92
4.5 Pruebas y ensayos	100
4.6 Análisis económico	103
4.7 Discusión de resultados	105
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	108
Conclusiones	109
Recomendaciones	111
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	112
ANEXOS	116

## RESUMEN

Se ha determinado la influencia de la presión de operación en la determinación de la presión de diseño, características energética constructivas, componentes sometidos a presión y de los esfuerzos para un Caldero de 200 BHP que permite el suministro de 2 Ton/de vapor saturado a una presión de servicio de 2 kgf/cm<sup>2</sup> y de operación de 4 kgf/cm<sup>2</sup>.

SE ha realizado la evaluación en función a diversas presiones de diseño determinándose que el valor optimo se consigue con una presión de diseño de 6 kgf/cm<sup>2</sup> ( 100 % del valor de la presión de operación)

Con respecto se incrementa la presión de diseño los tamaños de los materiales se incrementan ,incrementándose los costos de producción ,así como los esfuerzos mecánicos a las que se somete los componentes presurizados del caldero.

Se ha dimensionado un caldero de 200 BHP con 2 pazos, con 50 tubos por paso del tipo Sch 40 de 2 "en arreglo tresbolillo.

El costo de fabricación es de U\$ 316,000.00, así mismo se presentan los protocolos de prueba hidrostática y arranque en frio. Se hace mención que los cálculos, procesos de fabricación se realizan en función al código ASME para recipientes sometidos a presión.

PALABRA CLAVE: Diseño de un caldero según su presión.

## ABSTRACT

We have determined the influence of the operating pressure in determining the design pressure , energy constructive characteristics , pressurized components and efforts cauldron 200 for allowing delivery BHP 2 Ton / saturated steam at a pressure of 2 kgf / cm<sup>2</sup> and operating 4 kgf / cm<sup>2</sup> .

Evaluation was made according to various design pressures determined that the optimal value is achieved with a design pressure of 6 kgf / cm<sup>2</sup> ( 100 % of the value of the operating pressure )

Regarding the design pressure increases the material sizes are increased , increasing production costs and mechanical stresses to which the pressurized components undergoes cauldron .

Is dimensioned a cauldron of 200 BHP with 2 manors , with 50 tubes per pass of Sch 40 2 " type in staggered arrangement.

The manufacturing cost is \$ 316,000.00 , likewise hydrostatic test protocols are presented and cold start . Mention is made that the estimates , manufacturing processes are performed according to ASME code for pressure vessels .

KEYWORD : Design a cauldron by pressure.

# **CAPITULO I**

## **INTRODUCCION**

## **1.1 REALIDAD PROBLEMÁTICA**

Los generadores de vapor pirotubulares son equipos térmicos que juegan un rol muy importante dentro del proceso productivo de una empresa consumidora de energía. Grandes cantidades de flujo de combustible son utilizadas en Empresas consumidoras de energía en los generadores de vapor pirotubulares a media y baja presión desde 4 a 8 Bar según los requerimientos de cada empresa.

Las condiciones de diseño de un equipo térmico radican básicamente en obtener las características de un equipo que pueda operar con confiabilidad, sostenibilidad y seguridad durante su operación o vida útil. En este caso los calderos pirotubulares son equipos térmicos que aprovechan la energía térmica de un combustible el cual al reaccionar genera calor el cual es aprovechado por el agua para calentarse, y cambiar de fase en un proceso a presión constante, generalmente a una presión superior a la atmosférica, y dependiendo del requerimiento de la planta consumidora de energía requiera, esto es entre 4 a 12 bar de presión. Por ser un equipo presurizado las condiciones de cálculo térmico y diseño están ligados directamente a la presión de operación y por ende al presión de diseño, a través del cual se seleccionan los componentes del equipo, para esto formulamos el siguiente problema:

**¿Cuál es la influencia de la presión de operación en las características de diseño de un caldero pirotubular de 2 Ton/hora de vapor saturado?**

## **1.2 ANTECEDENTES:**

Se tienen los siguientes estudios que sirven como antecedente al presente informe de tesis:

ANDRADE JUAREZ, Gustavo (2011) , en su tesis para optar el título de Ingeniero Mecánico concluye lo siguiente: En la actualidad las calderas forman parte de los equipos más utilizados por la industria y junto con los hornos industriales, son los responsables del mayor porcentaje de consumo de combustibles en este sector, por

lo tanto, el mantenerlas trabajando con una buena eficiencia reditúa beneficios importantes en las empresas.

MENA CACERES , Fabrizzio(2010), en su tesis para optar el título de Ingeniero mecánico manifiesta lo siguiente: El objetivo principal de esta tesis fue determinar la capacidad y viabilidad de la caldera, por medio del diseño de un modelo matemático que pudiera realizar los cálculos necesarios para el análisis de este sistema, así como conocer las características tanto de la fuente de calor como las del proceso que se quiere alimentar en términos de flujos, calores específicos y temperaturas; y por medio de los resultados obtenidos establecer si el diseño de ésta caldera es correcto.

QUIÑONEZ CERCADO, Nick (2008) , en su tesis para optar el título de Ingeniero Mecánico concluye lo siguiente : Como se ha podido demostrar a lo largo del desarrollo de este proyecto de tesis, el software desarrollado es sin duda alguna una herramienta necesaria para el análisis y diseño térmico de las calderas pirotubulares horizontales ya que todos los cálculos se los realiza de manera muy rápida por no decir de una manera instantánea.

Una correcta interpretación de los datos llevará al diseñador a optimizar térmica, económica y ecológicamente este tipo de sistema térmico que sin duda tiene un amplio campo de utilización en la industria de nuestro medio por lo que es de suma importancia hacer que estos equipos funcionen de la mejor manera posible, teniendo en cuenta que la presión de operación como el parámetro fundamental para el cálculo de cada uno de los componentes.

RODRIGUEZ, Renato (2006) , en su tesis para optar el grado de magister en Ingeniería de control y automatización presenta el estado del arte de la automatización de calderas, el cual se fundamenta que estos equipos se caracterizan por presentar un comportamiento dinámico difícil, por lo que para poder obtener un funcionamiento efectivo y fiable real resulta necesario aplicar las estrategias de control avanzado. Se desarrolla el procedimiento completo de la identificación del proceso de variación de la presión del vapor en el cuerpo de una caldera de tubos de

fuego desde el diseño del experimento hasta la validación del modelo final, considerando los conocimientos físicos previos.

El objetivo fundamental de las calderas consiste en transformar en energía térmica la energía química contenida en los combustibles fósiles mediante su combustión y transferirla al agua para generar vapor. Durante la transformación de una forma de energía en otra se realizan múltiples operaciones que son interdependientes, por lo que el buen funcionamiento de una etapa está en función del funcionamiento adecuado de todas las etapas anteriores, siendo la característica principal de que estos equipos térmicos son isobáricos y operan de manera presurizada, en donde surge la importancia en el diseño y la operación del control de esta variable física.

### **1.3 DESCRIPCION DEL LUGAR DONDE SE HA REALIZADO EL ESTUDIO.**

#### **a. DATOS MARCO :**

Las Instalaciones de la Empresa FIC Ingenieros S.A están ubicadas en la Urb. San José. La Perla. Callao. La cual es una empresa especializada en el desarrollo de trabajos de Ingeniería, Construcción y Montaje de Equipos y Sistemas para la Industria Minera, Pesquera, Agroindustrial, Cemento, Estructuras y Edificios.

En este caso el equipo a diseñar se realizara por encargo de la Empresa Pesquera Capricornio S.A.Planta Callao.

MISION DE LA EMPRESA: Ser un equipo líder en Ingeniería de fabricación orientado a cumplir con los requisitos del cliente, soportados en un Sistema de Gestión de Calidad , según normas, comprometidos con la mejora continua.

**b. ORGANIGRAMA DE LA EMPRESA:**

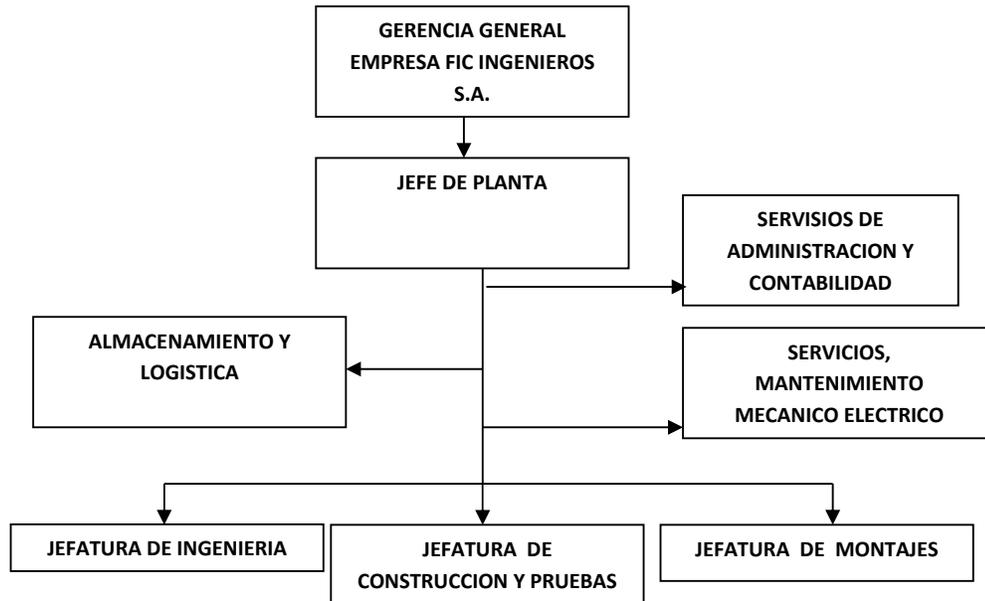


Figura N° 1 Organigrama de la Empresa

Fuente: Jefatura de Planta

**1.4 JUSTIFICACIÓN**

La necesidad de determinar una mejora en las condiciones de diseño de la empresa FIC Ingenieros ,se demuestra en lo siguiente:

- Es importante porque nos permitirá determinar la influencia de la presión en las características de diseño de un equipo térmico que opera presurizado, y a través del cual, según determinada la presión de diseño, se calculan los componentes del equipo, el cual tiene relación a los costos de construcción.
- Permitirá dimensionar correctamente un caldero pirotubular de 2 Ton/horas de producción requerido para una empresa en este caso la Empresa Capricornio S.A Planta Callao, para lo cual se debe tener en cuenta el equilibrio térmico entre los fluidos que intercambian energía, en donde el agua a evaporar esta presurizada, así como la década disposición, tamaño y longitud y numero de pazos del banco de tubos del caldero.

### **1.5 HIPÓTESIS :**

Se plantea la siguiente hipótesis: “La presión de operación influye significativamente en las características de diseño de un caldero pirotubular de 2 Ton/hora de vapor saturado en su cámara de combustión, banco de tubos y cilindro del caldero”.

### **1.6 OBJETIVOS:**

#### **OBJETIVO GENERAL**

Determinar la influencia de la presión de operación en las características de diseño de un caldero pirotubular de 2 Ton/hora de vapor saturado.

#### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Determinar los parámetros de diseño básico del caldero pirotubular de 2 Ton/hora de vapor saturado.
- Dimensionar los componentes sometidos a presión del caldero pirotubular de 2 Ton/hora de vapor saturado.
- Determinar los esfuerzos mecánicos de los componentes sometidos a presión del caldero pirotubular de 2 Ton/hora.
- Determinar los principales componentes auxiliares del Caldero de 2 Ton/hora de vapor saturado.
- Realizar ensayos de pruebas e inspección en operación de los componentes sometidos a presión del caldero pirotubular de 2 Ton/hora.
- Realizar un análisis económico del diseño del caldero pirotubular de 2 Ton/hora de vapor saturado.

**CAPITULO II:**  
**MARCO TEORICO**

## 2.1 GENERADORES DE VAPOR :

### 2.1.1 GENERALIDADES

#### a. DEFINICION:

Es un equipo térmico conformado por un recipiente metálico, cerrado, hermético , presurizado destinado a producir vapor o calentar agua u otro fluido mediante un proceso isobárico , mediante el suministro de una fuente de energía primaria( generalmente un combustible o también a través de una resistencia eléctrica) el cual libera calor el cual es aprovechado de manera indirecta por un fluido.

En la práctica el término “caldera” está destinada a ser utilizado por los generadores de vapor

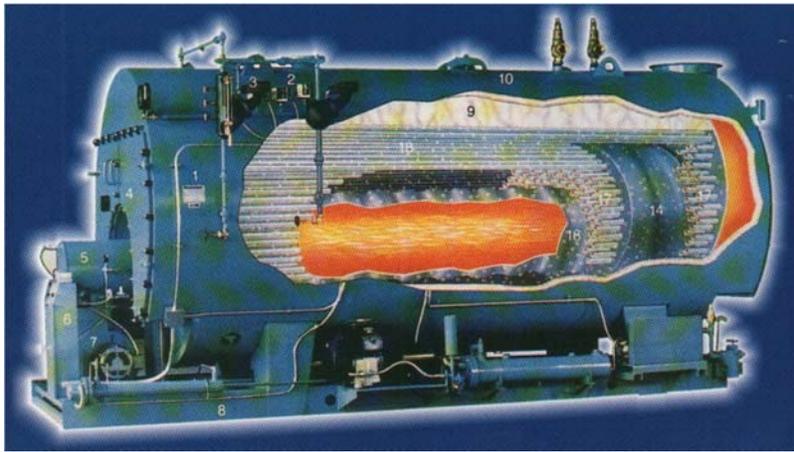


Figura N° 1 Corte lateral de un Caldero Pirotubular

Fuente: Cleaver Brooks

#### b. FUNCIONAMIENTO:

- El fluido (generalmente agua tratada químicamente, blanda) se inyecta al caldero mediante una bomba o conjunto de bombas a una presión superior al contenido en el caldero.
- El calor o energía térmica es suministrada a través de una fuente de energía primaria, mediante una reacción de oxidación entre un combustible (en función a su poder calorífico) y el oxígeno del aire comburente, a un determinado exceso de aire generándose gases de la combustión a alta temperatura.
- La eficiencia de la combustión depende del exceso de aire, en este caso es recomendable un 15 a 20% de exceso de aire para combustibles gaseosos y entre 20 a

30% para combustibles líquidos, para poder alcanzar un alto valor de temperatura de llama adiabática.

- La eficiencia de la combustión dependerá en su medida de la temperatura y de la presión del combustible, así como de la temperatura del aire comburente, así como de las condiciones de hermeticidad del hogar y de las condiciones de limpieza del quemador.

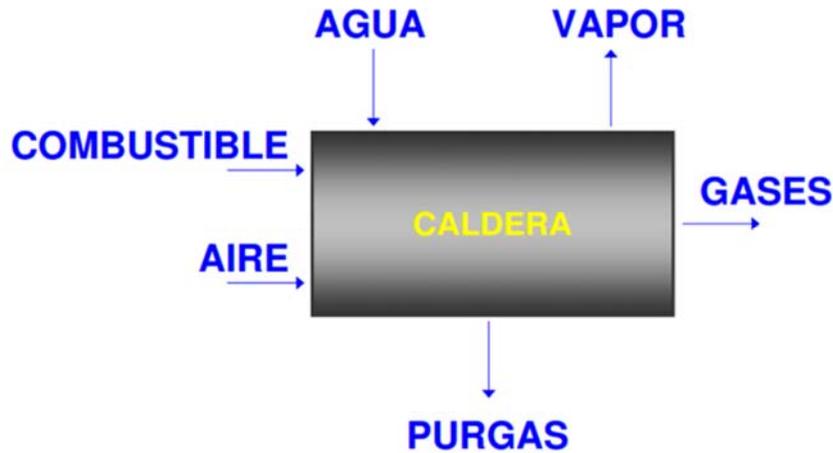


Figura N° 2 Diagrama de flujo de ingreso de energía en un caldero

Fuente: Elaboración propia.

- El calor se transfiere desde los gases de la combustión hacia el agua o fluido a calentar o a evaporar, mediante un rendimiento de aprovechamiento del calor suministrado en calor útil. Posteriormente los gases de la combustión abandonan el caldero en función a su característica del equipo ( tiro forzado o tiro inducido o tiro balanceado) mediante la chimenea( diseñada a una determinada altura).
- El agua calentada o en estado de vapor saturado o sobrecalentado fluye a través de una válvula de globo hacia el sistema de distribución de vapor. En un proceso intermedio parte del fluido es retirado mediante las purgas de fondo del equipo, esta operación se realiza en función a los requerimientos de control de calidad del agua.
- Es indispensable así mismo un adecuado control del nivel de agua y la presión de trabajo del equipo para una seguridad de la operación. El control de la presión juega un papel muy importante como parámetro de operación, seguridad, con lo cual el diseño de sus componentes y sistemas auxiliares son función de la presión de diseño.

### 2.1.2 CLASIFICACION:

La clasificación general de las calderas, de acuerdo al mayor uso en nuestro país, sería la siguiente:

#### a. ATENDIENDO A SU POSICION:

- Horizontales, la mayor parte de calderos pirotubulares.
- Verticales, por ejemplo los generadores de vapor recuperadores de calor.

#### b. ATENDIENDO A SU INSTALACION:

- Fija o estacionaria. Están ancladas en un lugar fijo.
- Móviles o portátiles. Se les utiliza para el accionamiento del sistema de propulsión naval o en locomotoras antiguas. En algunos casos son calderas de pequeña capacidad que pueden trasladarse de un lugar a otro, generalmente operan con resistencias eléctricas.

#### c. ATENDIENDO A LA UBICACIÓN DEL HOGAR:

- De hogar interior. La cámara de combustión se encuentra dentro del caldero.
- De hogar exterior. Existe una separación entre la cámara de combustión y la cámara de generación de vapor.

#### d. EN FUNCION AL FLUIDO DE TRABAJO:

- Caldera de vapor: es aquella caldera en el que el medio de transporte es vapor de agua.
- Caldera de agua caliente: Es aquella caldera cuyo medio de transporte es agua a temperatura inferior a 110 °C.
- Caldera de agua sobrecalentada: Es aquella caldera cuyo medio de transporte es agua a temperatura superior a 110 °C.
- Calderas de fluido térmico : El medio de transporte es un fluido térmico ( aceites, metales líquidos , dowtherm)
- Calderas de recuperación (GVRC o HRSG) : Calderas de vapor utilizadas en las Centrales de Ciclo Combinado , se caracterizan porque tienen doble o triple nivel de presión.

#### e. EN FUNCION AL CONTENIDO DE LOS TUBOS:

- Calderas pirotubulares: los gases de la combustión circulan dentro de los tubos. Se utilizan para la generación de vapor saturado en Plantas consumidoras de energía. Generan vapor a Baja y Media presión.
- Calderas acuotubulares: el agua circula dentro de los tubos. Se utilizan en las centrales de generación de vapor sobrecalentada para el accionamiento de turbinas de vapor en centrales termoeléctricas y en plantas de cogeneración.

**f. EN FUNCION A LA PRESION DE TRABAJO.**

- Calderas de Calefacción de Baja Presión: Calderas de agua caliente hasta 11.25 Bar y hasta 125 °C , y Calderas de vapor hasta 1.5 Bar.
- Calderas de vapor de Baja Presión: hasta 4 a 5 atm.
- Calderas de vapor de Media Presión: Hasta 20 atm.
- Calderas de vapor de Alta Presión : 20 atm a Presiones criticas
- Calderas Supercríticas : Mas de 225 atm y 374 °C

**g. CON RESPECTO A SU FORMA DE CALEFACCION:**

- Cilíndrica sencilla de hogar exterior.
- Con un tubo hogar (liso o corrugado).
- Con dos tubos hogares (liso o corrugado).
- Con tubo Galloway (calderas horizontales o verticales).
- Con tubos múltiples de humo (igneotubulares o pirotubulares).
- Con tubos múltiples de agua (hidrotubulares o acuotubulares).
- Con tubos múltiples de agua y tubos múltiples de humo (acuopirotubular o mixtas)

**h. CON RESPECTO AL VOLUMEN DE AGUA QUE CONTIENEN EN RELACION CON SU SUPERFICIE DE CALEFACCION:**

Se entiende por superficie de calefacción (SC) :La superficie total de planchas y tubos de la caldera que por un lado están en contacto con los gases y por el otro con el agua que se desea calentar. La superficie de calefacción se mide por el lado de los gases.

- De gran volumen de agua (más de 150 Ltrs. x m<sup>2</sup> de superficie de calefacción SC).
- De mediano volumen de agua (entre 70 y 150 Ltrs. x m<sup>2</sup> de SC).
- De pequeño volumen de agua (menos de 70 Ltrs. x m<sup>2</sup> de SC).

**i. SEGÚN LA CIRCULACION DEL AGUA DENTRO DE UNA CALDERA:**

- Circulación natural: El agua circula por efecto térmico.
- Circulación forzada: El agua se hace circular mediante bombas.

**j. SEGÚN EL TIPO DE COMBUSTIBLE:**

- De combustible sólido. Utiliza hogares con parrillas o pulverizadores de combustible sólido.
- De combustible líquido.
- De combustible gaseoso.

### 2.1.3 GENERADORES DE VAPOR PIROTUBULARES:

#### a. DEFINICION:

Son aquellos calderos de tipo paquete que se caracterizan por que los gases calientes de la combustión fluyen a través de los tubos, mientras que el agua está contenido en un deposito que contiene a los tubos, produciéndose la transferencia de calor desde dentro de los tubos hacia a fuera. El agua absorbe el calor necesario de los tubos radiantes generando vapor saturado.

En los primeros diseños, la caldera era simplemente un casco ó tambor con una línea de alimentación y una salida de vapor montado sobre una caja o marco de ladrillos. El combustible era quemado sobre una parrilla debajo del casco y el calor liberado era aplicado directamente a su parte inferior antes de que los gases salieran por la chimenea.

Los diseñadores de calderas muy pronto aprendieron que calentar una gran masa de agua en un recipiente era notoriamente ineficiente, que era necesario poner una mayor porción de esa agua en contacto con el calor.

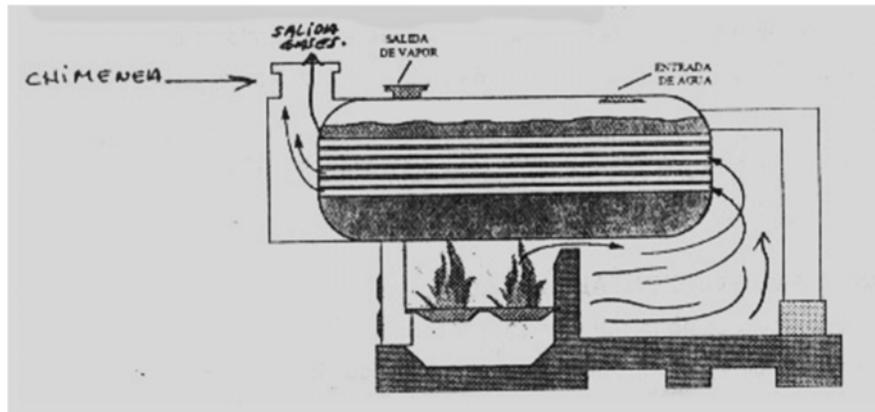


Figura N° 3 Primeros calderos pirotubulares

Fuente: Abarca Bahamondes

Una manera de lograr esto era dirigir los gases de la combustión dentro del recipiente o casco de la caldera. Este diseño dio origen a las calderas pirotubulares. Este nombre se debe a que en ellas el calor es transferido desde los gases de combustión, que fluyen por el interior de los tubos, al agua que los rodea.

El combustible es normalmente quemado debajo del casco y los gases son orientados a entrar en los tubos que se hallan en el interior del tambor de agua, haciendo su

recorrido en tres o más pasos. El vapor sale por la parte superior del tambor y la entrada de agua está generalmente 2" por encima de la huera de tubos más alta. Las calderas pirotubulares se desarrollaron principalmente en dos modelos: De retorno horizontal y de horno interno o tipo escocés.

- De Retorno Horizontal. Son calderas de un bajo costo inicial y de simple construcción, muy usadas en sistemas de calentamiento de edificios y producción de vapor para pequeñas factorías.

Consisten de un casco cilíndrico con gruesas paredes terminales entre las cuales se encuentra soportado un gran número de tubos de 3" o 4" de diámetro, aunque se pueden tener diámetros menores, esto da mayor superficie de transferencia y por ende mayor generación de vapor. (Similares a los de figura N° 3)

- De Horno Interno. Llamada también tipo **ESCOCÉS**, la combustión tiene lugar en un horno cilíndrico llamado FLUE o Hogar que se encuentra dentro del casco o tambor de la caldera. Los tubos de humo están a lo largo del casco y envuelven al hogar por los lados y su parte superior.

Los gases que salen del horno cambian de dirección en una cámara en el extremo y regresan, recorriendo completamente la unidad, hasta una caja de humos localizada en el frente.

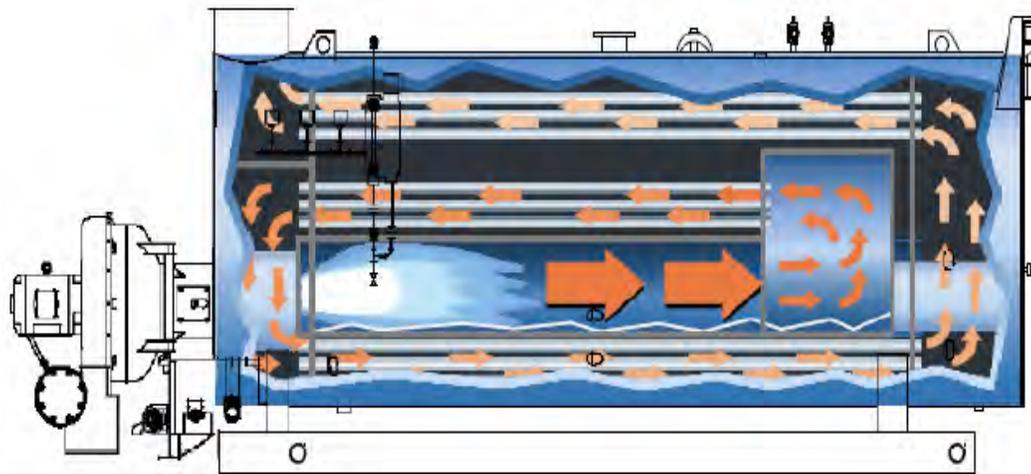


Figura N° 4 Corte de un caldero pirotubular

Fuente: INTESA

**b. COMPONENTES:**

- **HOGAR:** También llamada FLUE o cámara de combustión, es el espacio donde se realiza la combustión y en donde soporta las más altas temperaturas de combustión. Generalmente es corrugada (para poder compensar los esfuerzos térmicos por dilatación y contracción del material) tipo Morrison en lámina de acero al carbono en calidad ASTM A 285 grado C.

También debe tomarse en cuenta que la transferencia de calor a través de los tubos del hogar es por conducción, y esa chapa gruesa no conduce el calor tan rápidamente como la chapa fina. Esto es importante en particular en el Tubo hogar donde la temperatura de la llama puede alcanzar los 1 800°C, y donde el calor tiene que ser transferido muy rápidamente para evitar que se sobrecaliente y se hunda el tubo hogar con los consecuentes efectos desastrosos. El límite práctico para el grosor del tubo hogar está entre 18 mm y 20 mm, significando un límite práctico para el grosor del tubo hogar está entre 18 mm y 20 mm, significando un límite práctico de presión para las calderas piro-tubulares de alrededor de 27 bar.

- **BANCO DE TUBOS:** Está conformado por tubos de acero al carbono sin costura, procesados en caliente con extremos lisos a escuadra, generalmente cedula 40 y 60 (de 2 a 2 ½" generalmente para calderos de mediana y gran capacidad, para calderos de pequeña capacidad se usan tuberías de ½") en calidad certificada ASTM A 192 o ASTM 198, están fijados en los espejos del caldero de la siguiente forma: En la parte frontal van expandados., mientras que en la parte posterior van expandados y electro soldados con soldadura E7018. Las tuberías para calderas deben responder a los requerimientos de la aplicación, es decir, tener una excelente resistencia a la corrosión, temperatura y presión. En algunos diseños se instalan turbuladores dentro de los tubos para incrementar la turbulencia de los gases de la combustión.

La forma en que los tubos son arreglados en el espejo del caldero es muy importante; por lo general, la distancia entre los centros de los tubos (pitch) no debe ser menor a 1,25 veces el diámetro exterior de los mismos. En ciertas aplicaciones en las que se hace uso de fluidos limpios y de tubos pequeños (12,7 mm diámetro externo o menor) la relación pitch/diámetro puede reducirse a 1,20.

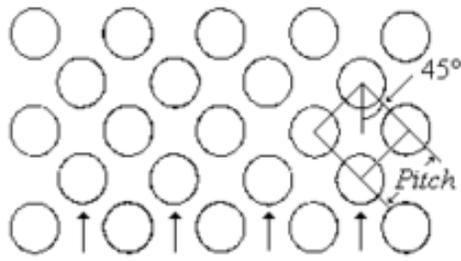


Figura N° 5 Arreglo cuadrado rotado

Fuente : Gonzales Mendizábal

Para obtener haces de tubos más compactos y económicos, se sugiere el uso de ángulos de 30° y 60°, los que permiten acomodar un 15% más de tubos que los otros, pero no deben ser usados cuando se requiera de limpieza externa por medios mecánicos. Para todos los haces de tubos con factores de ensuciamiento inferiores a 0,00035 m<sup>2</sup>.°C/W (0,002 °F.ft<sup>2</sup>.h/BTU) o menores, se prefiere el arreglo triangular de 30°.

La fijación de los tubos puede ser:

Expansión y Rolado(A) : Es la manera comúnmente utilizada por todos los fabricantes de calderas lo cual permite el movimiento lineal cuando el tubo se expande. Requiere re-expansión periódica.

Expansión, Enrolado y "Prossering" (B): Proceso exclusivo de la Marca Johnston, el cual captura el tubo por los dos lados de la placa tubular eliminando movimiento lineal y la re-expansión periódica correspondiente.

Expansión, Enrolado, Prossering y Soldadura (C): Un proceso opcional para rigidez adicional. Se puede cambiar el tubo sin deformar el agujero.

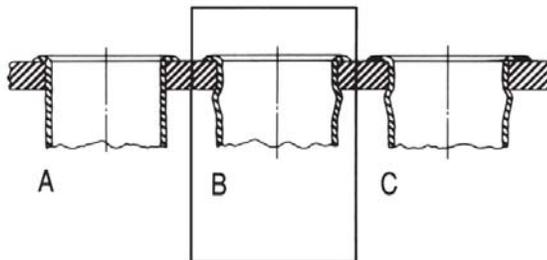


Figura N° 6 Fijación de tuberías

Fuente: Calderas Johnston

- **TAMBOR O CILINDRO:** Es el cilindro que conforma la parte exterior y da forma al caldero, está compuesto por:

Cámara de agua: Es el volumen de la caldera que está ocupado por el agua que contiene y tiene como límite superior un cierto nivel mínimo del que no debe descender nunca el agua durante su funcionamiento. Es el comprendido donde el nivel mínimo visible en el tubo de nivel hacia abajo.

Cámara de vapor : Es el espacio o volumen que queda sobre el nivel superior máximo de agua y en el cual se almacena el vapor generado por la caldera. Mientras más variable sea el consumo de vapor, tanto mayor debe ser el volumen de esta cámara.

En este espacio o cámara, el vapor debe separarse de las partículas de agua que lleva en suspensión. Por esta razón, algunas calderas tienen un pequeño cilindro en la parte superior de esta cámara, llamada “domo”, y que contribuye a mejorar la calidad del vapor (hacerlo más seco).

Aunque la transferencia de calor por el lado de humo es precisa para maximizar eficiencia térmica de la caldera, igualmente importante es la circulación eficiente de agua. La orientación de los tubos en el diseño de las calderas y el diseño de la cámara de intercambio de gases, sumergida en agua, promueve una excelente circulación de agua. Un espacio vacío de tubos directamente arriba del fogón separa el grupo de tubos del lado derecho de los del lado izquierdo, lo cual permite una corriente vertical de agua arriba del fogón. El movimiento del agua más fría fluye a los extremos de la caldera, baja por las paredes y vuelve a subir a la superficie mientras se calienta. Este diseño causa un efecto de circulación natural.

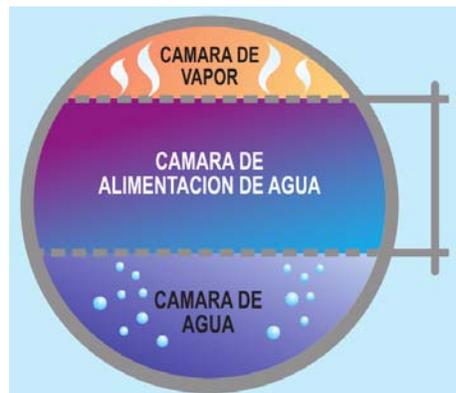


Figura N°7 Corte de la Cámara Principal del Caldero Piro-tubular

Fuente: SPYRAX SARCO

El cuerpo de presión de la caldera será totalmente soldado por fusión eléctrica de penetración completa. La lámina del vaso o cilindro de presión generalmente es de plancha de acero al carbono en Calidad Certificada ASTM A 285 grado C o ASTM A 515 Grado 70.

Las soldaduras se someterán a inspección radiográfica de acuerdo con lo ordenado por el Código ASME en sus secciones pertinentes. Una vez soldado íntegramente el cuerpo de presión será sometido a tratamiento térmico de normalización para eliminar los esfuerzos residuales producidos durante la soldadura.

La caldera estará cubierta con aislamiento de manta mineral de 2" de espesor, protegida con lámina C.R. calibre 20 y opcionalmente con lámina galvanizada o con lámina de acero inoxidable.

- **ESPEJOS:** O también llamadas placa tubos, fabricadas de lámina de acero al carbono en calidad ASTM A 285 grado C o 515 grado 70.

La placa de tubos o espejos además de cumplir con los requerimientos mecánicos, debe soportar el ataque corrosivo por parte de ambos fluidos y debe ser químicamente compatible con el material de los tubos. Por lo general están hechas de acero de bajo carbono con una capa delgada de aleación metalúrgica anticorrosiva.

- **CAMARAS DE HUMO:** Corresponde al espacio de la caldera en el cual se juntan los humos y gases, después de haber entregado su calor y antes de salir por la chimenea.

- **MAMPOSTERIA:** Se llama mampostería a la construcción de ladrillos refractarios o comunes que tienen como objeto:

Cubrir la caldera para evitar pérdidas de calor.

Guiar los gases y humos calientes en su recorrido.

Para mejorar la aislación de la mampostería se dispone, a veces, en sus paredes de espacios huecos (capas de aire) que dificultan el paso del calor. En algunos tipos de calderas se ha eliminado totalmente la mampostería de ladrillo, colocándose solamente aislación térmica en el cuerpo principal y cajas de humos. Para este objeto se utilizan

materiales aislantes, tales como lana de vidrio recubierta con planchas metálicas y asbestos.

- **PUERTAS DE EXPLOSION:** Son puertas metálicas con contrapeso o resortes, ubicadas generalmente en la caja de humos y que se abren en caso de exceso de presión en la cámara de combustión, permitiendo la salida de los gases y eliminando la presión. Solo son utilizables en calderas que trabajen con combustibles líquidos o gaseosos
- **REGISTROS:** También llamados registros de hombres, los cuales son tapas elípticas que se ponen e los fondos del cilindro del caldero o en la parte baja: Permiten la entrada de un hombre, con el fin de hacer un mantenimiento interno o inspeccionar ocularmente.

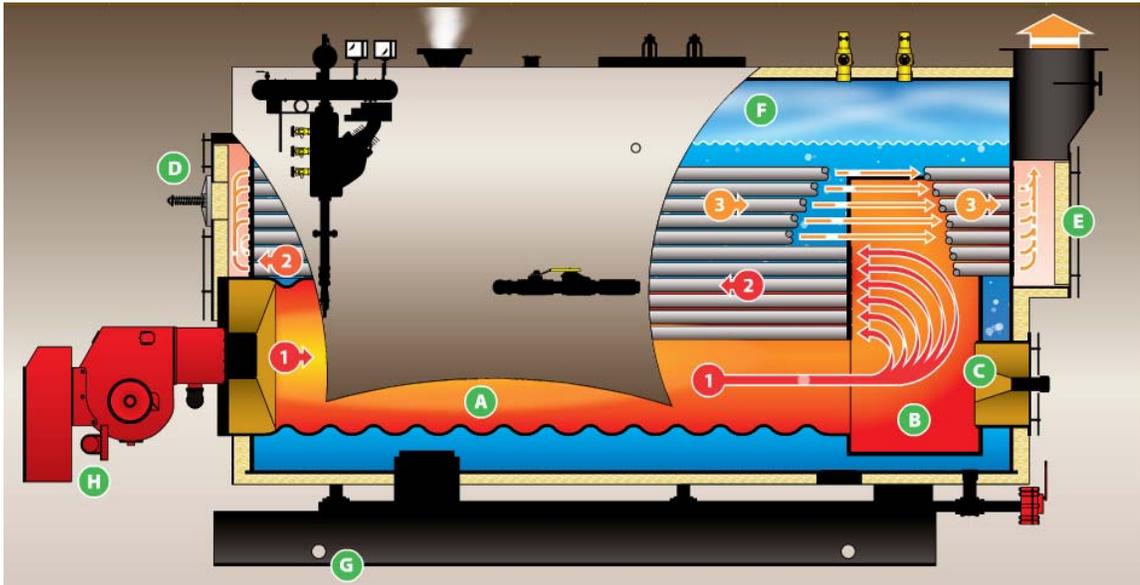


Figura N°8 Componentes de un Caldero Pirotubular

Fuente: Calderas Power Master

A	Flue	B	Caja de Humos posterior
C	Visor	D	Puerta de Explosión
E	Cámara de Humos posterior	F	Cámara de Vapor
G	Base	H	Quemador
1	1 Paso	2	2 Paso
3	3 Paso		

- **CHIMENEA:** Es el conducto de salida de los gases y humos de la combustión hacia la atmósfera, los cuales deben ser evacuados a una altura suficiente para evitar perjuicios o molestias a la comunidad. Además, tiene como función producir el tiraje necesario para obtener una adecuada combustión, esto es, haciendo pasar el aire necesario y suficiente para quemar el combustible, en caldera que usan combustibles sólidos. (Tiraje natural

Las dimensiones de la chimenea en cuanto a su altura y diámetro estarán determinadas por el tiraje necesario y condiciones de instalación respecto a edificios vecinas. En las calderas modernas existe tiraje artificial en que el movimiento del aire se hace por ventiladores sin descartar, desde luego, los usos de la chimenea.

El dámper es una compuerta metálica instalada en el conducto de humo que comunica con la chimenea o bien en la chimenea misma. Tiene por objeto dar mayor o menor paso a la salida de los gases y humos de la combustión.

**c. DISPOSICIONES:**

El “número de pasos” en una caldera de tubos de fuego es un parámetro que se refiere al número de corridas horizontales que los gases realizan entre el Hogar y la salida de los mismos. La cámara de combustión o el Hogar se consideran como primer paso; cada conjunto separado de tubos de fuego provee pasos adicionales como se muestra en Figura N° 9.

Según la disposición del flujo de los gases de la combustión tenemos los siguientes tipos:

- Recorrido en un sentido (de un paso). Son de baja potencia, y se caracterizan por que los gases calientes de la combustión fluyen dentro del hogar y posteriormente se expulsan a través de la chimenea. En este caso el caldero es de espalda seca con la chimenea ubicada sobre la cámara de humos posterior.
- Con retorno simple (de dos pasos). Conocidos como calderos de espalda húmeda, donde la chimenea esta sobre la cámara de humos frontal del caldero.
- Con retorno doble (de tres pasos) .Conocidos como calderos de espalda seca , donde la chimenea se ubica sobre la cámara de humos posterior del caldero ,en donde se ubica un mamparo o placa deflectora.

- Con retorno triple (de cuatro pasos). Conocidos como calderos de espalda húmeda, donde la chimenea se ubica sobre la cámara de humos frontal del caldero, son de potencias superiores a 1,000 BHP.

El número de pasos de gases de combustión en una caldera pirotubular no necesariamente determina su eficiencia característica. Para el mismo número total, longitud, y tamaño de tubos (misma superficie de calefacción), el incremento del número de pasos incrementa la longitud que los gases de combustión tienen que viajar debido a que los gases deben pasar a través de los tubos en serie más que en paralelo. Esto incrementa la velocidad de los gases de combustión dentro de los tubos pero hace poco para cambiar el tiempo total que los gases calientes fluyen desde el horno hasta la salida en contacto con las superficies calefactoras de los tubos.

El incremento en la velocidad de los gases en algunos casos puede mejorar la transferencia de calor incrementando la turbulencia de los gases mientras viajan a través de los tubos. Generalmente, sin embargo, el incremento en el número de pasos y la velocidad resultante de los gases incrementa la resistencia al flujo y fuerza al ventilador de aire a consumir más energía.

Los pasos en el lado de los tubos del espejo ocurren cada vez que el fluido atraviesa al equipo de un lado al otro. El arreglo de los pasos en el lado de los tubos y en la carcaza tiene mucha importancia a la hora del cálculo de la verdadera diferencia de temperaturas entre los dos fluidos y además permiten cambiar la velocidad del fluido al variar su número.

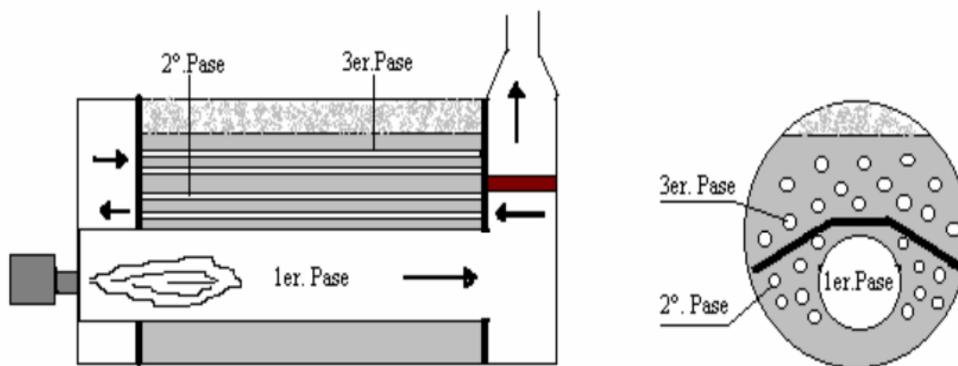


Figura N°9 Disposición de un Caldero Pirotubular de 3 pasos

Fuente: Spirax Sarco

Para calderas de alta capacidad y según diseño del fabricante, se tienen calderos de 1 o 2 hogares o flues y de 1 o 2 quemadores.

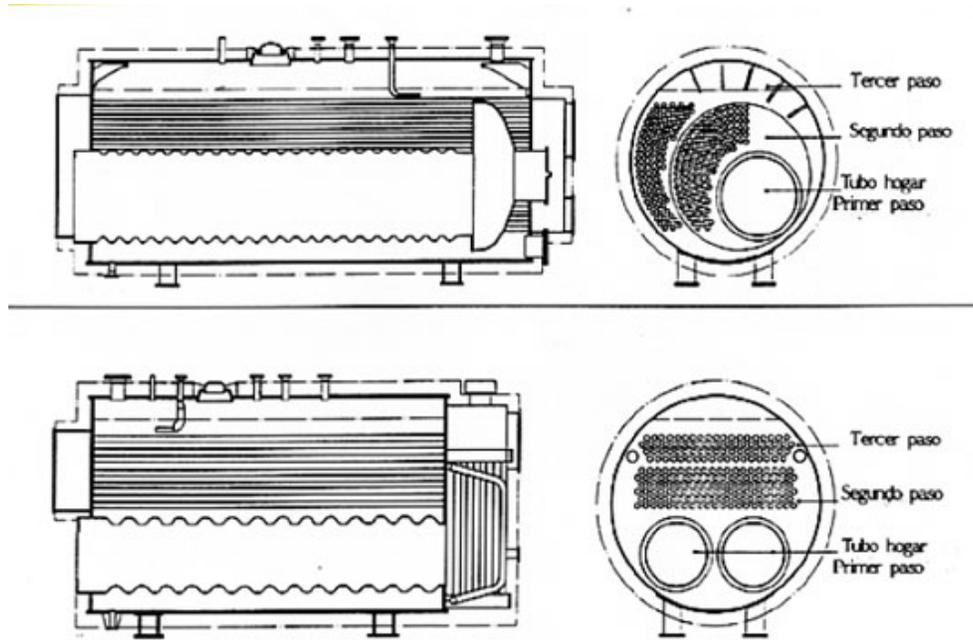


Figura 10 Caldero Pirotubular de 1 y 2 Flues.

Fuente: Calderas CB

**d. SISTEMAS DE SEGURIDAD, CONTROL Y MANDO:**

**• CONTROL DE LA PRESION:**

**VALVULAS DE SEGURIDAD:**

Uno de los accesorios importantes de la caldera es la válvula de seguridad. Su función es proteger el cuerpo de la caldera de sobrepresión y evitar que explote. La normativa BS 6759 (ISO 4126) trata de las válvulas de seguridad en calderas de vapor, y BS 2790 (8.1) trata de las especificaciones del diseño y fabricación de calderas pirotubulares de construcción soldada.

La válvula de seguridad de resorte es el dispositivo más empleado para el alivio de presión. También se la conoce con los nombres de válvula de alivio, válvula de alivio de seguridad, válvula de alivio de presión y válvula de seguridad de presión. Ciertas normativas como la API RP 520 y ANSI B-95.1-1977 presentan una terminología que establece algunas diferencias según que la apertura sea repentina y total, o proporcional

al aumento de presión. Se puede definir como un dispositivo que automáticamente sin otra asistencia de energía que la del propio fluido implicado, descarga fluido para evitar que se exceda una presión predeterminada y que esté diseñada para que vuelva a cerrar y se evite el flujo adicional de fluido después de haberse restablecido las condiciones normales de presión.

Hay muchos tipos diferentes de válvulas de seguridad instaladas en la planta de la caldera, todas deben cumplir el siguiente criterio:

La(s) válvula(s) de seguridad deberá(n) dar salida a un caudal de vapor equivalente a la potencia térmica de la caldera.

El rango de capacidad de descarga total de la(s) válvula(s) de seguridad debe estar dentro del 110% de la presión de diseño de la caldera. El orificio que conecta una válvula de seguridad a una caldera debe ser como mínimo de 20 mm.

La tara máxima de la válvula de seguridad será la presión máxima permisible de trabajo de la caldera. Debe haber un margen adecuado entre la presión normal de trabajo de la caldera y la tara de la válvula de seguridad.

Las calderas con una capacidad de evaporación superior a 3,700 kg/h tendrán instaladas como mínimo una válvula de seguridad o una válvula de seguridad doble (dos válvulas con una válvula de conmutación), dependiendo del rendimiento de la caldera.

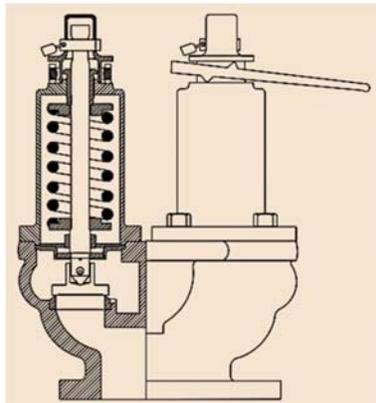


Figura N° 11 Válvula de seguridad

Fuente: Spirax Sarco

**PRESOSTATOS:** Son accesorios que funcionan sobre la base de la máxima y mínima presión de trabajo de la caldera. Actúan sobre el quemador, apagándolo al llegar a la máxima presión para lo cual fue regulado y encendiéndolo al alcanzar la mínima presión

deseada. El presostato también es conocido como interruptor de presión. Es un aparato que cierra o abre un circuito eléctrico dependiendo de la lectura de presión de un fluido.

**MANOMETROS:** Son medidores de presión del tipo Tubo de Bourdon, con un diámetro mínimo de 150 mm. Debe tener marcada la presión de trabajo normal y la presión de trabajo máximo permisible. Estos se conectan al caldero mediante un tubo sifón en "R" que está lleno de vapor condensado para proteger el mecanismo del manómetro a las altas temperaturas y la presión.

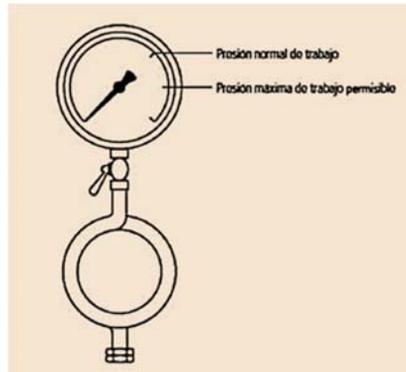


Figura N° 12 Manómetro BOURDON

Fuente: Spirax Sarco

- **CONTROL DE NIVEL DEL AGUA:**

Es un dispositivo de control de nivel compuesto por un tubo de vidrio en el cual se puede verificar el nivel de agua el cual generalmente está a 2" de la fila más alta de tubos.

Esta unida a un sistema de control del tipo McDonnell Miller.



Figura N° 13 Válvula de seguridad

Fuente :Spirax Sarco

**e. CIRCUITO DE SUMINISTRO DE AGUA:**

La materia prima para la generación de vapor va a ser el agua de alimentación, por lo tanto tiene que suministrarse permanentemente a la caldera a fin de mantener la generación constante de vapor. En un tanque de agua de alimentación se encuentran el condensado retornado del sistema y agua nueva de aportación, conocida como agua de reposición, esto va a constituir una gran parte de atención en la caldera, debido a que una mala operación de sus componentes podría llevar a consecuencias graves.

Unos de los mayores agentes dañinos de los gases disueltos es el oxígeno, este efecto causa picaduras de metal, para eliminarlo se debe calentar el agua de alimentación o realizar un tratamiento químico para que sea adecuada usar en la caldera. Además con agua caliente se utilizaría menos combustibles, pues sería mucho más fácil alcanzar la temperatura de ebullición del agua a la presión de trabajo. Por lo que es recomendable obtener una temperatura regulada de 80 °C, por los beneficios propuestos, pero no se debe sobrepasar esta temperatura en el agua de alimentación, debido a que causaría problemas de cavitación en la bomba y por consiguiente su pronto deterioro y riesgos para la caldera. La eficiencia de la caldera aumenta con la elevación de la temperatura de agua de alimentación. Un incremento en la temperatura de agua de alimentación redundará en un aumento del rendimiento de aproximadamente el uno por ciento.

Los componentes básicos de un sistema de agua de alimentación de una caldera son: Tanque de almacenamiento, Equipo de bombeo y el equipo de control.

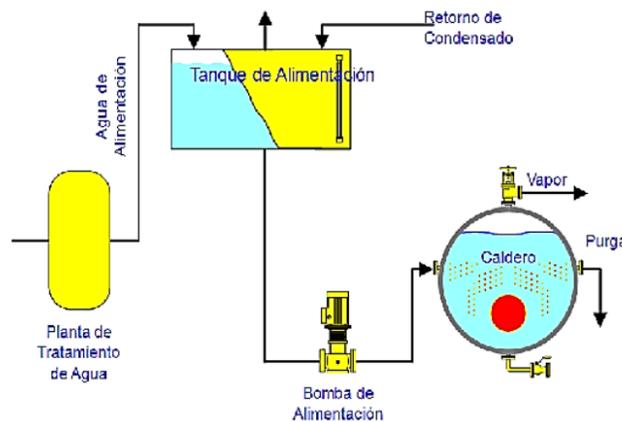


Figura N° 14 Circuito de suministro de Agua

Fuente: Yépez Ormeño

- **CALIDAD DEL AGUA:**

El objetivo principal del tratamiento de agua es evitar problemas de corrosión e incrustaciones, asegurando la calidad del agua de alimentación y del agua contenida en la caldera.

Dentro de las propiedades del agua tenemos las siguientes:

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

**Dureza.** La dureza del agua cuantifica principalmente la cantidad de iones de calcio y magnesio presentes en el agua, los que favorecen la formación de depósitos e incrustaciones difíciles de remover sobre las superficies de transferencia de calor de una caldera. Se expresa como la concentración total de calcio y magnesio en  $\text{mgCO}_3/\text{L}$ .

**Oxígeno.** El oxígeno presente en el agua favorece la corrosión de los componentes metálicos de una caldera. La presión y temperatura aumentan la velocidad con que se produce la corrosión.

**Hierro y cobre.** El hierro y el cobre forman depósitos que deterioran la transferencia de calor. Se pueden utilizar filtros para remover estas sustancias.

**Dióxido de carbono.** El dióxido de carbono, al igual que el oxígeno, favorecen la corrosión. Este tipo de corrosión se manifiesta en forma de ranuras y no de tubérculos como los resultantes de la corrosión por oxígeno.

La corrosión en las líneas de retorno de condensado generalmente es causada por el dióxido de carbono. El  $\text{CO}_2$  se disuelve en agua (condensado), produciendo ácido carbónico. La corrosión causada por el ácido carbónico ocurrirá bajo el nivel del agua y puede ser identificada por las ranuras o canales que se forman en el metal.

**Fosfato.** El fosfato se utiliza para controlar el pH y dar protección contra la dureza.

**Sólidos disueltos.** Los sólidos disueltos es la cantidad de sólidos (impurezas) disueltas en al agua.

**Sólidos en suspensión.** Los sólidos en suspensión representan la cantidad de sólidos (impurezas) presentes en suspensión (no disueltas) en el agua.

**Secuestrantes de oxígeno.** Los Secuestrantes de oxígeno corresponden a productos químicos (sulfitos, hidracina, hidroquinona, etc.) utilizados para remover el oxígeno residual del agua.

**Sílice.** La sílice presente en el agua de alimentación puede formar incrustaciones duras (silicatos) o de muy baja conductividad térmica (silicatos de calcio y magnesio).

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

**Conductividad.** La conductividad del agua permite controlar la cantidad de sales (iones) disueltas en el agua.

Se recomienda que el pH del agua de alimentación debe estar entre 8 y 9, y el agua de la caldera deberá tener un pH entre 10.5 y 11.0

- **UNIDAD DE BOMBEO:**

Son bombas centrífugas especiales, del múltiples etapas, con la característica de que pueden variar el caudal bombeado, sin disminuir la presión de bombeo, generalmente son de doble o más impulsores o rodets y reemplazan las empaquetaduras con sellos mecánicos. La marca más reconocida de estas turbomaquinas son las bombas AURORA PUMP.



Figura N° 15 Bomba Multi-etapica para calderos

Fuente: AURORA PUMP

- **DESAREADOR:**

Es un depósito aéreo el cual recepciona los condensados calientes de proceso (a temperaturas cercanas o superiores a 100°C) los cuales se mezclan con el agua blanda de reposición. Los desareadores deben estar aislados y es recomendable de estar

ubicados a una altura de 10.2 metros sobre el nivel, con la finalidad de que la succión se realice con agua presurizada a alta temperatura (puede estar a 1.2 o 1.3 Bar de presión , con temperaturas de 104 a 106 °C). A una temperatura cercana a los 100°C ocurre la liberación del O<sub>2</sub> hasta en 0.005 ppm y del CO<sub>2</sub> contenido en los condensados (son gases que provocan corrosión en la tubería de los calderos).

**f. CIRCUITO DE SUMINISTRO DE COMBUSTIBLE:**

El sistema de combustible de una caldera depende en gran medida que la mezcla aire-combustible sea la correcta para que la combustión sea eficiente. La combustión es una reacción química y violenta en la cual generalmente se desprende una gran cantidad de calor y luz. En toda combustión existe un elemento que arde y se denomina combustible y otro que produce la combustión (comburente), generalmente el oxígeno gaseoso. Una combustión incompleta se debe a que la mezcla no está en la proporción adecuada, dando como resultado generación de cenizas.

• **SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE COMBUSTIBLES LIQUIDOS DE ALTA VISCOSIDAD:**

**DESCRIPCION:** Los combustibles de alta viscosidad almacenados requieren de un precalentamiento para conseguir una viscosidad que permita su bombeo al depósito de consumo diario de combustible.

**EQUIPOS:**

Depósitos enterrados o bóvedas.

Depósitos Aéreos o de superficie.

**ELEMENTOS ENERGETICOS PRINCIPALES:**

Tanques de calentamiento calorifugados con calentador térmicos con vapor saturado a baja presión o calentador eléctricos.

Equipos de control de temperatura.

Sistemas de control de nivel.

Bombas de transvase de alta viscosidad.

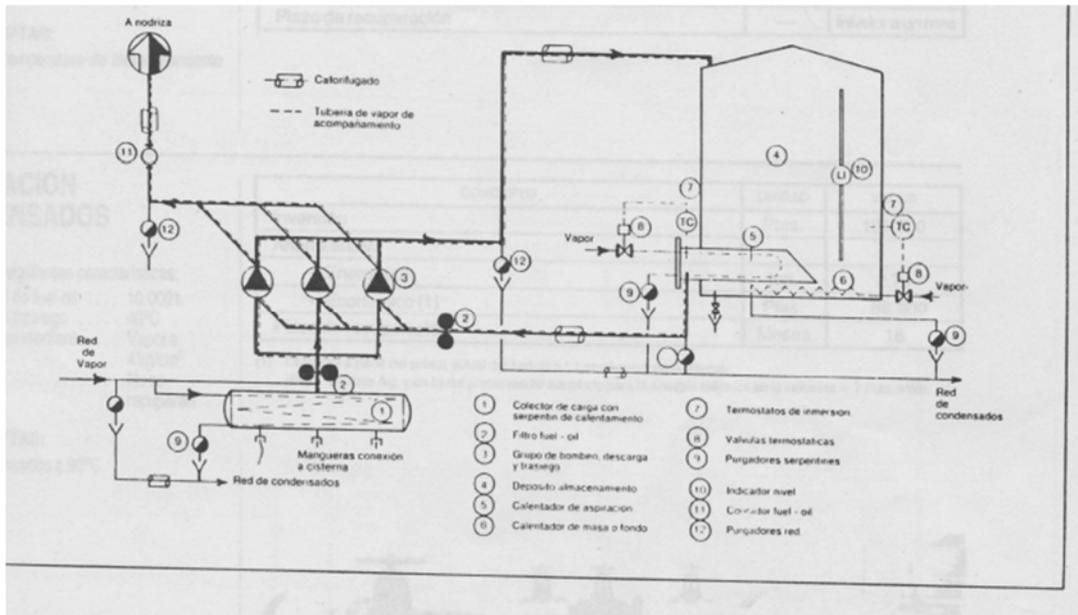


Figura Nº 16 Sistema de Almacenamiento de Combustible  
Fuente : CONAE

#### **MEDIDAS DE OPERACIÓN:**

Mantener almacenado el combustible a 30°C .

Trasegar el combustible a 40°C .

Emplear para el calentamiento del combustible en el orden de preferencia fluidos calientes de recuperación, vapor ( a baja presión) y electricidad.

Recuperar los condensados de los calentadores.

Instalar purgadores termodinámicos en las tuberías de vapor.

Aislar las tuberías de petróleo para evitar pérdida de temperatura.

Controlar las fugas de petróleo.

En algunos combustibles es adecuado centrifugar para eliminar el agua contenido en el combustible.

- **SISTEMA DE PREPARACION Y SUMINISTRO DE COMBUSTIBLE LIQUIDOS DE ALTA VISCOSIDAD:**

**DESCRIPCION:** El combustible en este caso el Petróleo R500 que deberá llegar a los quemadores para su combustión, precisa de una preparación previa que comprende las operaciones básicas de: Filtrado , precalentamiento y presurizado.

La preparación del combustible con las características requeridas por cada tipo de quemador se realiza en las siguientes fases:

- En el depósito nodriza con calentamiento previo y decantación de agua y de sedimentos.
- Filtrado del combustible.
- Calentamiento a través de un calentador térmico a vapor o un calentador eléctrico hasta temperaturas cercanas a 90°C , en caso del petróleo biodiesel no se realiza calentamiento debido a su viscosidad.
- Bombeo a través de bombas de engranajes o de tornillos (VIKING PUMP o BOMBAS VICKERS)
- En grupos de preparación independientes del quemador o en equipos integrados en el. Dependiendo del tipo de combustibles se tienen quemadores estáticos o rotativos , o también atmosféricos o presurizados , los cuales se controlan el flujo en relación al suministro de aire proporcionado por un ventilador.
- El control de la operación se realiza mediante programadores automáticos.

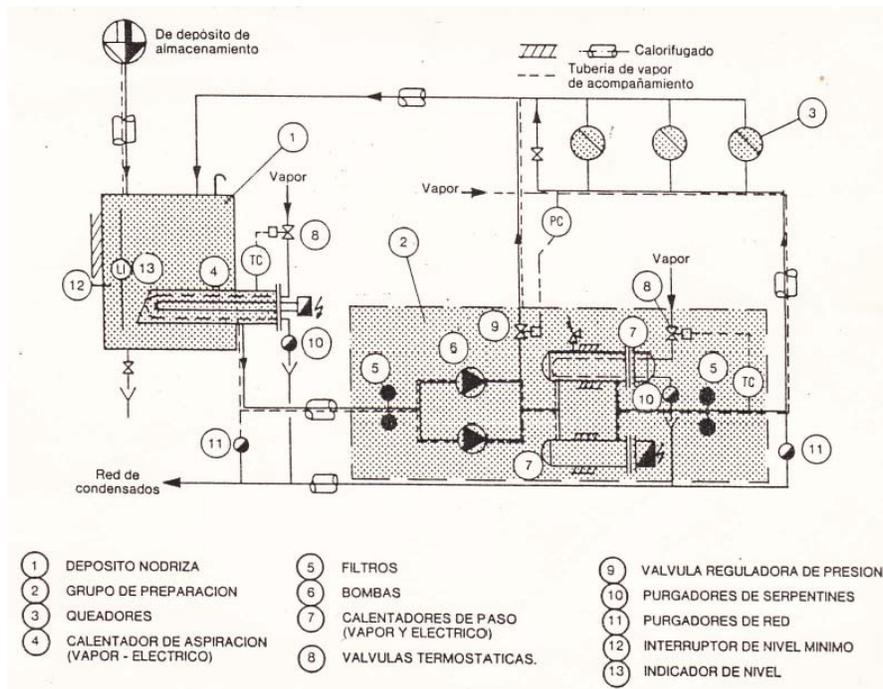


Figura Nº 17 Preparación del Combustible  
Fuente: CONAE

**g. VENTAJAS :**

- Menor costo inicial, debido a la simplicidad de diseño en comparación con las acuotubulares de igual capacidad.
- Mayor flexibilidad de operación, ya que el gran volumen de agua permite absorber fácilmente las fluctuaciones en la demanda de vapor.
- Menores exigencias de pureza en el agua de alimentación, porque las incrustaciones formadas en el exterior de los tubos son más fáciles de atacar y son eliminadas por las purgas.
- Facilidad de inspección, reparación y limpieza.

**h. DESVENTAJAS:**

- Mayor tamaño y peso que las acuotubulares de igual capacidad.
- Mayor tiempo para subir presión y entrar en funcionamiento.
- Gran peligro en caso de explosión o ruptura, debido al gran volumen de agua almacenado.
- No son empleadas para altas presiones.

**2.1.4 INDICADORES DE COMPORTAMIENTO:**

**a. BOILER HOURSE POWER:**

La potencia de la caldera viene dada por HP de caldera (BHP), tal como fue establecida en 1889 por la ASME. Esta medida estaba basada en una máquina de vapor que empleaba 13.62 kg (30 lb) de vapor por HP hora a una presión relativa de 4.9 kg/cm<sup>2</sup> (70psi) y con el agua de alimentación de la caldera a 38.5 °C (101 °F). Actualmente esto corresponde a la evaporación de 15.65 kg (34.5 lb) de agua por hora a 100 °C (212 °F), lo cual significa la conversión de 15.65 kg de agua por hora a 100 °C en vapor saturado a 100 °C, a la presión atmosférica normal (1.033 kg/cm<sup>2</sup>), dentro un Área de transferencia de calor de 0.929 m<sup>2</sup>. Existen calderos desde 1 BHP hasta 2,500 BHP. Es un parámetro de comparación solo entre calderos pirotubulares.

$$1 \text{ BHP} = 15.65 \text{ kg/h} * 538.9 \text{ kcal/kg} = 8,437 \text{ Kcal/h} = 9.81 \text{ kW}.$$

**b. CAPACIDAD MAXIMA DE GENERACION DE UN GENERADOR DE VAPOR:**

En función a la Potencia del Caldero y la Presión de diseño, se obtiene la máxima capacidad de generación de vapor saturado ,según la siguiente ecuación:

$$\text{Maxima capacidad de generacion de vapor} = \frac{\text{Potencia delcaldero}}{h_2 - h_1} \dots \dots (1)$$

Dónde:

$h_2$  = Es la entalpia final del vapor saturado a la presión de diseño.

$h_1$  = Es la entalpia inicial del agua a la presión de diseño y a la temperatura de ingreso del agua al caldero.

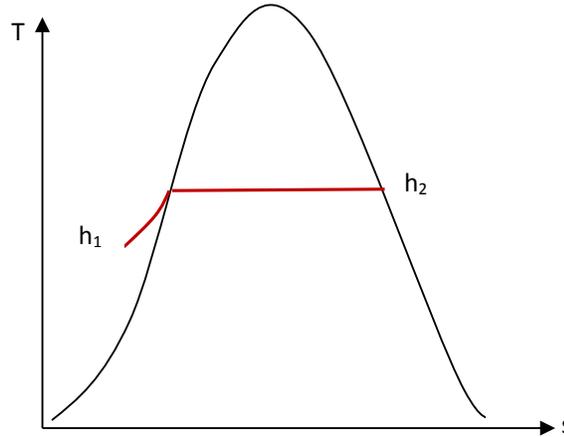


Figura N° 18 Diagrama T vs s para la generación de vapor saturado  
Fuente : Elaboración propia

**c. FACTOR DE CARGA:**

Es un parámetro de comparación entre los BHP reales o de operación y los BHP nominales, con la finalidad de poder determinar el grado de utilización del caldero en relación a su máxima capacidad de operación.

$$\text{FACTOR DE CARGA DE UN CALDERO} = \frac{\text{BHP reales}}{\text{BHP nominales}} \dots \dots (2)$$

Es recomendable operar un caldero con un Factor de Carga entre el 85 al 90 % , valor en el cual se alcanza el máximo rendimiento del equipo.

**d. EFICIENCIA DE UN CALDERO :**

La eficiencia térmica es el indicador más importante de un generador de vapor como una caldera, ya que caracteriza el grado de aprovechamiento de la energía suministrada, o sea, la parte de esa energía que ha sido transferida al agente de trabajo.

El objetivo de una caldera, además de generar vapor, es realizar con la máxima eficiencia posible la transferencia de calor, definiendo esta de una manera sencilla como la porción de calor liberado en el horno que es absorbido por los fluidos en los elementos de la caldera.

Cuando se selecciona una caldera se deben considerar los siguientes parámetros:

- Cantidad de vapor requerida.
- Presión, temperatura, calidad del vapor requerido.
- Futuros requerimientos.
- Localización de la unidad.
- Características de la carga.
- Tipos de combustibles disponibles.
- Diseño de quemadores.
- Calidad del agua de alimentación.
- Variaciones previstas de la carga.

El rendimiento o eficiencia de una caldera relaciona su habilidad para transferir calor del combustible al agua satisfaciendo ciertas especificaciones de operación. El rendimiento de la caldera incluye todos los aspectos de la operación.

Las especificaciones de rendimiento incluyen la capacidad operativa y los factores para ajustar esa capacidad, la presión del vapor, la calidad del agua de la caldera, las temperaturas de la caldera, el análisis de los gases de combustión, el análisis del combustible y de los residuos de combustión.

El resultado de un cálculo que involucra la especificación de rendimiento es una eficiencia calculada. La eficiencia de la caldera se presenta como un porcentaje entre del calor suministrado a la caldera y el calor absorbido por el agua de la caldera.

La mayor pérdida energética de diversas calderas depende de la masa de los gases de combustión y su temperatura cuando salen de la caldera. Para obtener la pérdida neta de energía de los gases de combustión, la temperatura del aire de entrada al quemador y del combustible debe considerarse.

Cuando el hidrógeno de los combustibles reacciona con el oxígeno del aire, forma agua, la cual sale de la caldera en forma de vapor sobrecalentado. El calor latente de este vapor es una pérdida energética, la cual es aproximadamente del 5 al 6 % para combustibles líquidos como el diesel. El porcentaje de hidrógeno y humedad en el combustible afecta esta pérdida. La energía útil a la salida de las calderas es el calor transportado por el vapor.

Esto se mide usualmente como un flujo de vapor en la caldera y se ajusta para obtener el contenido energético utilizando mediciones adicionales de presión o de temperatura, o ambas. Aunque estos procedimientos proveen información acerca de la salida de energía útil, no proveen información acerca de la contribución de la caldera a esta energía útil. Para determinar la contribución de la caldera, el calor del agua entrante debe sustraerse del calor transportado a la salida de la caldera.

Se tiene la siguiente normatividad para evaluar los calderos pirotubulares:

**BRITISH STANDARDS, BS845: 1987 (Normas Británicas)**

El Estándar británico BS845: 1987 describe los métodos y condiciones en las cuales una caldera debería ser probada para determinar su eficacia. Para las pruebas para ser hechas, la caldera debería ser manejada en condiciones de carga estables (la carga generalmente llena) para el periodo de una hora después de lo cual las lecturas serían tomadas durante la hora siguiente de operación estable para permitir a la eficacia ser calculadas.

La eficacia de una caldera es cotizada como el porcentaje de calor útil disponible, expresada como un porcentaje de la energía total potencialmente disponible quemando el combustible. Esto es expresado sobre la base del valor calorífico total (GCV).

Esto trata con el equilibrio de calor completo y esto tiene dos partes:

1ra Parte: Trata con calderas estándar, donde el método indirecto es especificado.

2da Parte: Trata con la planta compleja donde hay muchos canales de flujo de calor.

En este caso, tanto los métodos directos como indirectos son aplicables, en el todo o en parte.

**ASME STANDARD: PTC-4-1 POWER TEST CODE FOR STEAM GENERATING UNITS**

(Norma ASME - Código de Prueba de Poder para Unidades de Generación de Vapor)

Esto consiste en:

1ra Parte: Método Directo (llamada también como método de entrada – salida).

2da Parte: Método Indirecto (llamadas como método de las pérdidas de calor).

**IS 8753: INDIAN STANDARD FOR BOILER EFFICIENCY TESTING**

(Norma india para Pruebas de Eficiencia de Calderas)

La mayor parte de normas para el cómputo de eficiencia de caldera, incluyendo la IS 8753 Y BS 845 están diseñadas para la medición in situ de la eficiencia de la caldera.

Invariablemente, todas estas normas no incluyen el golpe abajo como una pérdida en el proceso de determinación de eficacia.

Básicamente la eficiencia de caldera puede ser probada por los métodos siguientes:

El Método Directo: Donde el beneficio de energía del fluido trabajador (el agua y el vapor) es comparado con el contenido de energía del combustible de caldera.

El Método Indirecto: Donde la eficacia es la diferencia entre las pérdidas y la entrada de energía.

El método Directo , conocido como el Método de Entrada - Salida de la caldera debido al hecho que esto necesita sólo la salida útil (el vapor) y la entrada o suministro de calor a través de una fuente de energía primaria (p. ej. el combustible) para evaluar la eficiencia. Refleja la influencia de la variación del estado de operación de la caldera incluyendo los arranques y paradas del quemador así como las purgas de la caldera.

Esta eficacia puede ser evaluada usando la fórmula:

$$\eta = \frac{\text{Energía o Potencia Calorífica Util}}{\text{Energía o Potencia Calorífica suministrada}} * 100\% \dots \dots (3)$$

$$\eta = \frac{\dot{m}_v * (h_2 - h_1)}{\dot{m}_c * Pci} * 100\%$$

Dónde:

$\dot{m}_v$  =Flujo de vapor generado por hora,  
( $h_2 - h_1$ )=Variación de entalpía de vapor.  
 $\dot{m}_c$  =Flujo másico del combustible,  
Pci : Poder calorífico inferior.

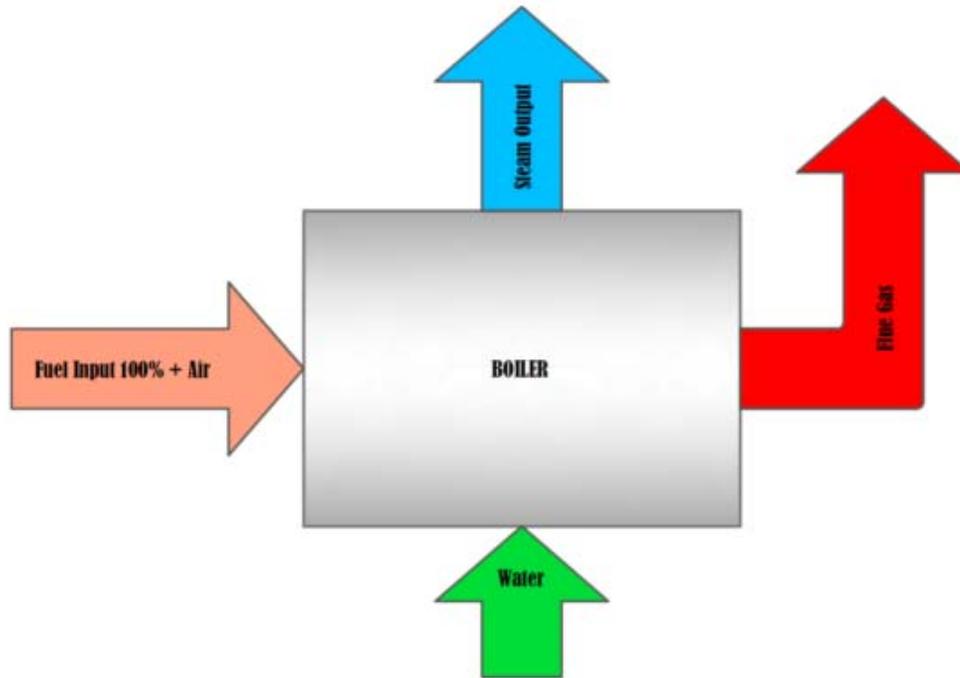


Figura N° 19 Balance de Energía Método Directo

Fuente: Elaboración Propia

#### **POTENCIA CALORIFICA SUMINISTRADA O DE ENTRADA:**

Tanto la entrada de calor como la salida de calor deben ser medidas. La medida de entrada o suministro de potencia calorífica o de calor requiere el conocimiento del valor calorífico del combustible y su caudal en términos de masa o volumen, según la naturaleza del combustible.

Para combustible gaseoso: Un contador de gas del tipo aprobado puede ser usado y el volumen medido debería ser corregido para la temperatura y la presión. Una muestra de gas puede ser recogida para la determinación de valor calorífico, pero es por lo general aceptable usar el valor calorífico declarado por los proveedores de gas.

Para combustible líquido: El fuel oil pesado es muy viscoso, y esta propiedad varía bruscamente con la temperatura. El medidor, que por lo general es instalado sobre la aplicación de combustión, debería ser considerado como un indicador aproximado solamente y, para fines de prueba, un medidor calibrado para el aceite particular debe ser usado y sobre una gama realista de temperatura debería ser instalado. Aún mejor es el uso de un tanque de día calibrado con precisión.

Para combustible sólido: La medida exacta del flujo de carbón u otros combustibles sólidos es muy difícil. La medida debe basarse en la masa, lo que significa que los aparatos voluminosos se debe ser instalado sobre el piso de edificio de la caldera. Las muestras deben ser tomadas y empaquetadas durante toda la prueba, las bolsas selladas y enviadas a un laboratorio para el análisis y la determinación del poder calorífico. En algunas casas de caldera más recientes, el problema ha sido aliviado por el montaje las tolvas sobre las calderas sobre células de carga calibradas, pero estos son aún raros.

#### **POTENCIA CALORIFICA UTIL O CALOR DE SALIDA**

Hay varios métodos, que pueden ser utilizados para medir la producción de calor. Con las calderas de vapor, un medidor de vapor instalado se puede utilizar para medir el flujo, pero esto debe ser corregido para la temperatura y la presión. En años anteriores, este enfoque no se vio favorecido por el cambio en la precisión del orificio o medidores de Venturi de caudal. Ahora es más viable con medidores de flujo moderno de la variable del orificio o tipos de vórtice-vertimiento.

La alternativa con calderas pequeñas es medir el agua de alimentación, y esto se puede hacer antes de calibrar el tanque de alimentación y anotar los niveles de agua durante el comienzo y el final de la prueba. Se debe tener cuidado de no bombear agua durante este período. Además de calor para la conversión de agua de alimentación a la temperatura de entrada de vapor, se considera para la producción de calor. En caso de calderas de purga intermitente, la purga debe evitarse durante el período de prueba. En caso de calderas de purga continua, la pérdida de calor debido a la purga debe ser calculada y añadida al calor en el vapor.

## 2.2 CRITERIOS ENERGETICOS DE DISEÑO:

La transferencia de calor de una caldera es sin duda uno de los análisis más importantes al momento de diseñar térmicamente calderas pirotubulares horizontales ya que, como se conoce, la termodinámica solamente nos da una idea de las cantidades globales de energía que debe de manejar un sistema determinado, mientras que la transferencia de calor nos ayuda a determinar dimensiones geométricas para saber cuales son los medios necesarios para lograr transmitir dichas cantidades de energía y obtener así los resultados requeridos. Para el caso del hogar de la caldera se considera que la transferencia de calor se da solamente por radiación de dos maneras: radiación luminosa (llama) y radiación no luminosa (productos de combustión caliente) hacia el agua en el exterior, mientras que para el haz de tubos se considera que la transferencia de calor se da en su totalidad por convección desde los productos de combustión hacia el agua en el exterior.

### a) CALCULOS PRELIMINARES:

Para el diseño de un generador se tienen dos parámetros básicos para su dimensionamiento, son la presión de operación y el caudal requerido en planta.

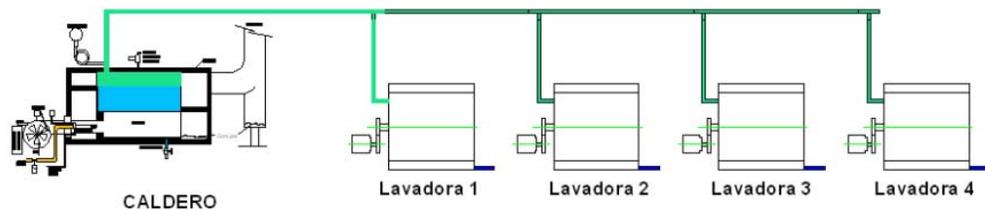


Figura N° 19 Ubicación de las Presiones en Planta

Fuente: Spirax Sarco

- **Selección de las Presiones:**

**Presión de Consumo:** Es la presión del vapor requerido en los centros de consumo de energía. Se toma en cuenta el valor de la presión con mayor valor numérico de todos los centros de consumo.

**Presión de Operación:** Es la presión de generación de vapor saturado, se determina con un margen de seguridad entre 50 a 100 % de la presión de consumo.

$$Presion\ de\ operacion = < 1.5 - 2.0 > Presion\ de\ consumo \dots (4)$$

Presión de Diseño: Esta referida a la presión de diseño de los componentes sometidos a presión y es función de la presión de operación:

$$Presion\ de\ diseño = 1.5\ a\ 2\ Presion\ de\ operacion \dots\dots (5)$$

Presión de Prueba hidrostática: Se denomina a la presión de prueba que se realiza para poder determinar la estanqueidad del equipo, se calcula según la siguiente ecuación:

$$Presion\ hidrostatica = 2 * Presion\ de\ diseño \dots\dots (6)$$

- Determinación de los BHP nominales: Teniendo en cuenta la máxima demanda de vapor requerida se determina el valor de los BHP nominales o de diseño.

$$BHP_{operacion} = \frac{\dot{m}_v * (h_2 - h_1)}{8437} \dots\dots\dots (7)$$

Teniendo en cuenta un factor de seguridad de 1.2, con el cual el factor de carga es de 80% se determina los BHP nominales o Potencia nominal del equipo.

$$BHP_{corregido} = BHP_{operacion} * 1.2 \dots\dots\dots (8)$$

Seguidamente se debe reajustar el del BHP corregido hacia el valor inmediato superior en centenas, con la finalidad de tener calderas de referencia. Se debe tener en cuenta que para equipos de baja capacidad las potencias de 50, 150 y 250 BHP.

$$BHP_{diseño} = BHP_{corregido}\ aproximar\ a\ valores\ comerciales \dots\dots (9)$$

- Reajuste del vapor generado. Se determina el valor del vapor saturado requerido hacia un valor de vapor saturado de diseño.

$$\dot{m}_{v\ nominal} = \frac{8437 * BHP_{diseño}}{(h_2 - h_1)} \dots\dots\dots (10)$$

- Determinación del flujo nominal de combustible, valor que nos permitirá dimensionar el sistema de alimentación de combustible y el quemador. Se debe tener en cuenta la eficiencia de diseño del equipo , para el cual se recomienda (Texto Calderas Industriales de Jose Bernal) asumir el valor de máxima eficiencia , el cual es 85%.

$$\dot{m}_{c\ nominal} = \frac{\dot{m}_v\ nominal * (h_2 - h_1)}{P_{ci} * \eta_{nominal}} * 100\% \dots \dots (11)$$

**b) DIMENSIONAMIENTO DE COMPONENTES:**

Se tiene como referencia el texto: Operación de Calderos de Juan Bernal.

• **CARACTERISTICAS DE LOS TUBOS :**

Para potencias relativamente bajas , las casas constructoras recomiendan tuberías de acero sin costura de 2" de diámetro NPS en el caso de Potencias iguales y menores a 200 BHP , y para valores superiores a este ,se seleccionan tuberías de diámetro nominal NPS de 2 ½".

Se determina el Número de Cedula de la tubería en función de la siguiente ecuación:

$$Numero\ Sch = 1000 * \frac{Presion\ de\ diseño}{Esfuerzo\ del\ material} \dots (12)$$

En función a los 11 números Sch existentes se selecciona el valor obtenido o se aproxima al valor inmediato superior. Para calderas de baja potencia se tienen valores de Sch 40, 60 y 80.

La longitud de la tubería es función de la Potencia de diseño en función a la siguiente ecuación:

$$L_{tubos} (m) = (0.048 * BHP_{diseño}) + 0.3 \dots (13)$$

El Área lateral de cada tubo se determina teniendo en cuenta las dimensiones nominales de la tubería según su Numero de Sch.

$$A_{c/tubo} = \pi * D_{exterior} * L_{tubo} \dots \dots (14)$$

Para la determinación del Área de calefacción, se tiene en cuenta que esta área tiene parámetros diferentes a los elementos sólidos, este valor es una función de la potencia del caldero, se tiene la siguiente ecuación:

$$A_{calefaccion} = 0.465 * BHP_{diseño} - 0.004 \dots \dots (15)$$

Para la determinación del número de tubos se relaciona el área total de calefacción y el área lateral de cada tubo, según la siguiente ecuación:

$$N_{tubos} = \frac{A_{calefaccion}}{A_{c/tubo}} \dots (16)$$

Para optimizar la transferencia de calor hacia el interior del caldero, es necesario estudiar brevemente la convección natural en tuberías, teniendo en cuenta que en cada una de ellas se crea una capa limite tal como se muestra en la figura:

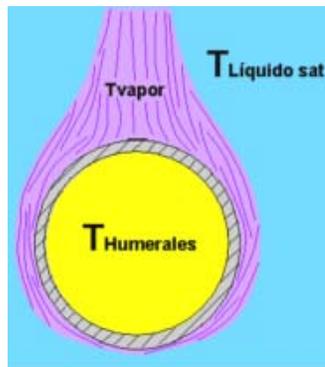


Figura N° 20 Capa limite resultante alrededor de los tubos

Fuente: Bernal (Operación de Calderos)

Siendo este el caso, los tubos en los espejos deben tener una distribución óptima de triángulo equilátero, fácil para su desmontaje. Así mismo las casas constructoras recomiendan una distancia o paso entre tubos de 1.25 a 1.75 por el diámetro exterior del tubo.

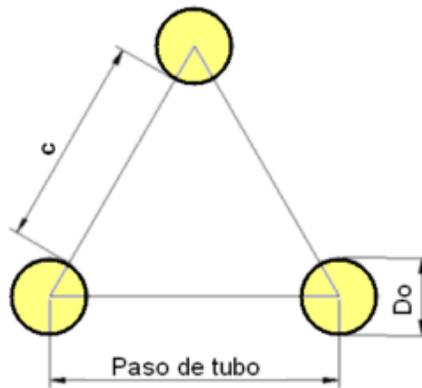


Figura N° 21 Distribución equilateral de tubos  
 Fuente: Bernal (Operación de Calderos)

El valor recomendado para el diámetro de espejo de 1.06 m cuando la potencia de diseño del caldero es inferior a 100 BHP, así mismo se sugiera tomar como referencia los valores comerciales de catálogos de fabricantes reconocidos, tal como Distral o Cleaver Broks.

- **SELECCIÓN DEL TAMAÑO DEL HOGAR:**

El hogar o flue es un tubo cuyo diámetro debe estar entre el 40 y 45 % del espejo.

La disposición del hogar en el espejo depende exclusivamente de la distribución que el diseñador de a los tubos dentro de los espejos; es decir que puede subir o bajar a lo largo del eje vertical de tal forma que se asegure que sobre el mismo existen dos filas de tubos y que tenga el área de acumulación de vapor tal como se muestra en la figura.

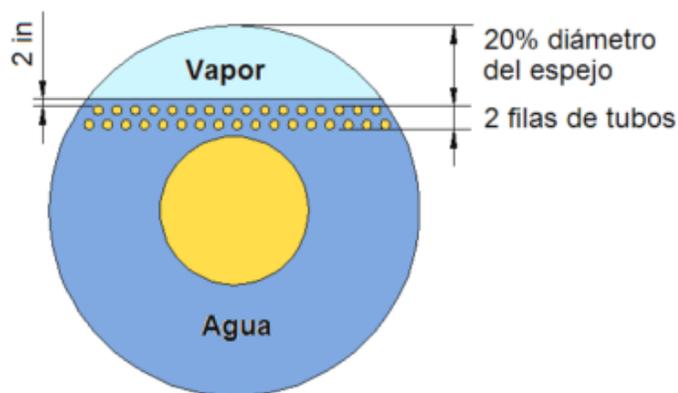


Figura N°22 Disposición del hogar respecto al eje vertical

Fuente: Bernal (Operación de Calderos)

**c) TRANSFERENCIA DE CALOR ENTRE COMPONENTES:**

La transferencia de calor de una caldera es sin duda uno de los análisis más importantes al momento de diseñar térmicamente calderas pirotubulares horizontales ya que, como se conoce, la termodinámica solamente nos da una idea de las cantidades globales de energía que debe de manejar un sistema determinado, mientras que la transferencia de calor nos ayuda a determinar dimensiones geométricas para saber cuáles son los medios necesarios para lograr transmitir dichas cantidades de energía y obtener así los resultados requeridos. Para el caso del hogar de la caldera se considera que la transferencia de calor se da solamente por radiación de dos maneras: radiación luminosa (llama) y radiación no calor se da en su totalidad por convección desde los productos de combustión hacia el agua en el exterior. Es importante mencionar que el modelo planteado en este proyecto se fundamenta en un análisis de diferentes volúmenes de control (secciones) en los cuales son divididos tanto el hogar como el haz de tubos de la caldera. En este capítulo se explicará de mejor manera en que consiste el modelo planteado en este análisis de transferencia de calor.

- **TRANSFERENCIA DE CALOR EN EL HOGAR DE LA CALDERA.**

La mayor parte de flujos de calor en el hogar de la caldera se da en gran cantidad por medio de la radiación y no así por convección. Partiendo de lo planteado el estudio mostrado a continuación se enfoca principalmente en analizar detalladamente los tipos de transferencia de calor por radiación que se dan dentro del hogar de la caldera. Para dicho estudio fue necesario plantear los siguientes supuestos: La transferencia de calor dentro del hogar de la caldera se realiza mediante radiación y no interviene la convección debido que a pesar de que en la realidad existe una pequeña contribución de convección, esta se ve contrarestanda por el efecto de la reradiación que se da entre cada uno de los volúmenes de control en los que es dividido el hogar.

La cámara de combustión se comporta como un cuerpo negro debido al hollín que se va a acumular en sus paredes.

Se considerará un coeficiente convectivo interior en el hogar referido a la transferencia total de calor por radiación, es decir la luminosa (proveniente de la llama) y de la no luminosa (proveniente de los gases calientes). No existe generación interna de energía ya que no se analiza la energía de formación en la reacción de combustión del combustible si no que utilizando el poder calorífico inferior se considera la energía del combustible como un valor constante. El sistema se encuentra en estado estable. La temperatura de los productos de combustión es aproximadamente la temperatura de la llama. Los únicos gases participativos en la transferencia de calor por radiación son el vapor de agua y el dióxido de carbono.

Dentro de los tipos de transferencia de calor por radiación dentro del hogar de la caldera se puede citar los siguientes: La radiación no luminosa que básicamente es la proveniente de los productos de combustión calientes, y La radiación luminosa que es aquella que proviene desde la llama propiamente dicha.

- **TRANSFERENCIA DE CALOR EN EL HAZ DE TUBOS DE LA CALDERA.** El paso de los gases de combustión por el haz de tubos de las calderas pirotubulares horizontales sirve básicamente para aprovechar al máximo la energía que aún se encuentra en dichos gases de combustión teniendo en cuenta que en esta sección de la caldera ya no existe llama alguna y que la temperatura de los gases es suficientemente baja por lo que solo se considera que la transferencia de calor se da básicamente por convección desde

gases calientes hacia el agua que se encuentra alrededor de los tubos. Para que el análisis que se muestra a continuación tenga validez se deben considerar los siguientes supuestos: El sistema se encuentra en estado estable, La transferencia de calor se da solo por convección desde los gases de combustión hacia el agua alrededor de los tubos.

- **PÉRDIDAS POR RADIACIÓN Y CONVECCIÓN POR LA CORAZA DE LA CALDERA.**

Las pérdidas de calor en cualquier sistema son de mucha importancia ya que muchas veces este parámetro puede ser determinante en el cálculo de la eficiencia con la que trabaje un sistema determinado. En esta sección de este capítulo se va a analizar solamente la pérdida de calor que se da en la coraza de la caldera y no las pérdidas de calor que se dan en las tapas de la misma ya que en estas últimas, siempre están recubiertas en su interior por concreto refractario y adicional a esto, generalmente la tapa frontal, que es la que recibe los productos de combustión a una temperatura elevada, tiene en su fondo ladrillos aislantes lo cual hace que la pérdida de calor por dichas tapas sea insignificante en comparación a las tasas de calor general que maneja la caldera.

Otra razón por la que se desprecia el calor perdido por las tapas y no en la coraza, se debe a que el área superficial de la coraza es mayor que el área superficial de las tapas de la caldera teniendo así una mayor pérdida de calor considerando el medio por el cual se da este efecto.

### **2.3 ESFUERZOS MECANICOS PARA EL DISEÑO:**

En los años 20, no existía ningún criterio a la hora de diseñar calderas y recipientes a presión. Ocurrían explosiones por causas desconocidas. Fue entonces cuando en esta misma década la American Society of the Metal and Electricity (ASME) comenzó a crear códigos para utilizar en el diseño y control de los recipientes que fuesen a trabajar a presión.

La ASME VIII Div. 1, Es la parte encargada de diseño, tiene distintas partes que comprenden cálculo de espesores, cálculo de aberturas, conexiones, etc. Esta norma para diseño de calderas y recipientes a presión es utilizada a nivel mundial, aunque existe otras normas como: Norma alemana (AD-Merkblätter), Diseño de calderas

según normativa española UNE 9-300. Es necesario verificar que la empresa oferente de este tipo de equipos este certificada en cuanto a calidad, lo que implica que dicho fabricante usa alguna de estas normas para la fabricación y montaje.

**a) ESFUERZO EJERCIDO SOBRE LOS TUBOS Y CILINDRO**

En la figura se muestra como se encuentra actuando las fuerzas sobre los tubos:

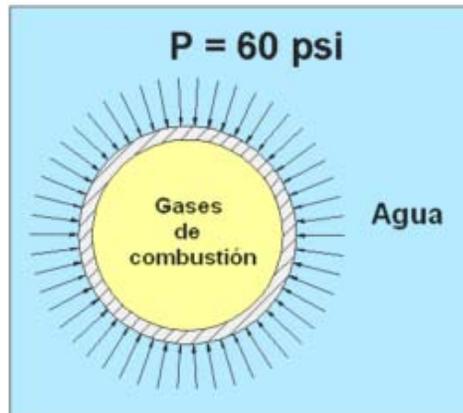


Figura N°23 Fuerzas radiales actuantes sobre los tubos

Fuente : Robles Espejo (Diseño de Caldero de baja potencia)

$$\sigma_{radial} = - \frac{Presion\ de\ diseño * \frac{D_e}{2}}{espesor\ de\ tubería} \dots \dots (17)$$

El signo negativo indica que los tubos están sometidos a un esfuerzo de compresión y que para presión indicada el espesor de tubo soporta con demasía, entonces se debe utilizar la tubería en función a un factor de seguridad. Debe cumplirse que:

$$\sigma_{radial} < \sigma_{maximo\ admisible}$$

De manera similar se utiliza la ecuación N°17 para determinar el esfuerzo radial de tracción ejercido sobre el cilindro del caldero.

**b) CAIDA DE PRESION:**

La caída de presión es un Parámetro de suma importancia en el momento de determinar la potencia que debe tener el ventilador a utilizarse en la caldera para un

flujo determinado de productos de combustión. Este parámetro es sin duda de suma importancia ya que se puede dar el caso de que un determinado arreglo de tubos tenga un excelente comportamiento térmico pero, sin embargo, la potencia a emplearse en el ventilador puede llegar a ser demasiada elevada teniendo que rechazar el arreglo de tubos analizado teniendo que variar los parámetros de entrada hasta lograr resultados razonables tanto de transferencia de calor como de potencia consumida para asegurar de que ocurra dicho efecto. Una manera de mostrar los componentes de la caída de presión total de los productos de combustión se muestra a continuación:

$$\Delta P_{total} = \Delta P_{hogar} + \Delta P_{haz-tubos} + \Delta P_{ce} \dots \dots (18)$$

Dónde:

$\Delta P_{total}$ : Caída de presión total.

$\Delta P_{hogar}$ : Caída de presión en el hogar de la caldera.

$\Delta P_{haz\_tubos}$ : Caída de presión en el haz de tubos.

$\Delta P_{ce}$ : Caída de presión en contracciones y expansiones abruptas.

- **CAIDA DE PRESION A LO LARGO DE LA CALDERA:**

Para el análisis de la caída de presión dentro del hogar de la caldera se debe tener en consideración los siguientes supuestos para que dicho análisis tenga validez:

Los productos de combustión se encuentran a lo largo de todo el hogar de la caldera, inclusive en la zona que se genera la reacción de combustión.

Las propiedades de los gases de combustión estará representadas principalmente por dióxido de carbono, vapor de agua, nitrógeno y oxígeno. No se considera la presencia de azufre en la ecuación del combustible.

Debido a la presión no elevada dentro del hogar se considera como flujo incompresible a los gases de combustión.

Teniendo en cuenta los supuestos citados anteriormente se puede comenzar el análisis propiamente dicho. Es de suma importancia decir que las propiedades de los gases de

combustión, al igual que para el análisis térmico, dependen de la distribución de temperatura que se da dentro del hogar de la caldera.

La caída de presión es calculada mediante una relación muy conocida que es la de Darcy-Weisbach la cual se muestra a continuación:

$$\Delta P_{hogar} = f * \frac{\rho * l_{hogar} * v^2}{2 * D_{i-hogar}} \dots \dots (19)$$

Donde:

hogar: Longitud del hogar.

f: Factor de fricción.

v: Velocidad de los gases de combustión.

El parámetro que hace falta determinar es el factor de fricción el cual se calcula de la siguiente manera:

Lo primero que se procede a realizar es el cálculo del número de Reynolds para verificar el tipo de flujo que se tiene en el interior del hogar mediante la siguiente relación y el factor de fricción se determina en relación al diagrama de Moody.

$$Re_D = \frac{4 * \dot{m}_p}{\pi * D_{i-hogar} * \mu_p} \dots (20)$$

De esta relación se determina cual era el estado del flujo de gases de combustión, es decir, si tratábamos con flujo turbulento, laminar o en transición en función al siguiente rango:

$Re_D \leq 2100$  Flujo laminar

$2100 < Re_D \leq 10000$  Flujo en transición

$Re_D > 10000$  Flujo turbulento.

- **CAIDA DE PRESION EN EL HAZ DE TUBOS:**

Para el caso de la caída de presión dentro del haz de tubos se realiza exactamente el mismo procedimiento que se sigue para el caso del hogar de la caldera. Lo único que hay que tener en consideración en esta parte del análisis es que el flujo másico que pase por cada uno de los tubos de un determinado pase de la caldera será igual a la

razón entre el flujo másico total y el número de tubos del pase como se muestra a continuación:

$$\dot{m}_{p-i} = \frac{\dot{m}_p}{N_i} \dots \dots \dots (21)$$

El análisis de la caída de presión es suficiente realizarlo en un solo tubo ya que la caída de presión entre la entrada y la salida del haz será igual en todos los demás tubos.

La diferencia que se puede presentar en el haz de tubos es que dichos tubos tengan turbuladores en su interior por lo que las ecuaciones de factor de fricción a utilizar varían.

- **CAIDA DE PRESION EN CONTRACCIONES Y EXPANSIONES ABRUPTAS:**

La caída de presión en contracciones y expansiones abruptas se presenta básicamente en las partes de la caldera que se describen a continuación:

Expansión abrupta: A la salida del hogar de la caldera y en la salida después de cada paso de la caldera.

Contracción abrupta: A la entrada de cada uno de los pases de la caldera y a la entrada a la chimenea.

Una vez determinadas las partes por donde existe caída de presión por contracciones y expansiones abruptas dentro de la caldera se procede a plantear las ecuaciones que permiten cuantificar el valor de dicha caída de presión.

La caída de presión se la evalúa mediante la siguiente correlación:

$$\Delta P = K_L * \frac{V_p^2}{2 * g} \dots \dots \dots (22)$$

Dónde:

$K_L$  = Coeficiente de pérdida que varía dependiendo si se trata de una expansión o contracción.

Habiendo calculado la caída de presión de los productos de combustión a lo largo de su recorrido en el hogar de la caldera como del haz de tubos, se puede calcular sin mayores complicaciones la potencia que debe tener el ventilador de la caldera siempre y cuando se haya determinado de ante mano cual es el flujo de aire que se necesita

para la combustión que depende directamente de las condiciones ambientales, esto es, temperatura ambiente y metros sobre el nivel del mar.

**c) ESFUERZOS DE CONFORMACION EN EL CILINDRO:**

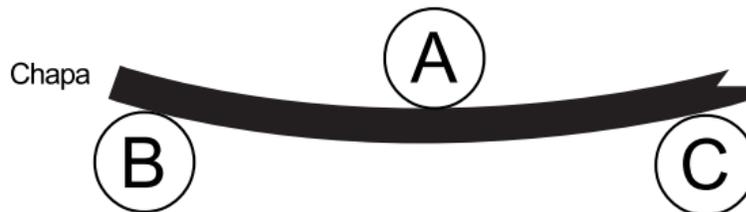
Las tensiones que pueden imponerse en la caldera están limitadas por las Normativas. La tensión máxima estará alrededor de la circunferencia del cilindro. Se le llama tensión 'de Circunferencia'. El valor de esta tensión puede calcularse usando la ecuación conocida como la Ecuación de Laplace Young:

$$\sigma_{\text{circunferencia}} = \frac{\text{Presion de operacion} * \text{Diametro interior del caldero}}{2 * \text{espesor del material del caldero}} \dots (23)$$

Por tanto podemos deducir que la tensión aumenta si aumenta el Diámetro. Para compensar esto, el fabricante de calderas usará una chapa más gruesa. Sin embargo, esta chapa más gruesa es más dura de curvar y puede necesitar eliminar las tensiones internas.

Uno de los problemas en la fabricación de una caldera es curvar la chapa del cuerpo. Las curvadoras, como muestran las Figuras 24 y 25, no pueden curvar los extremos de la chapa y, por tanto, estos quedan planos.

El rodillo A está ajustado hacia abajo para reducir el radio de la curvatura



Los rodillos B y C están motorizados para alimentar la chapa a través de los rodillos.

Figura N° 24 Curvadora de chapas de cuerpo de caldera

Fuente : Spirax Sarco

Cuando se sueldan las chapas y la caldera se presuriza, el cuerpo tendrá una sección transversal redonda. Cuando la caldera se para, los chapas volverán a la forma de cuando se curvaron. Esto puede causar grietas de fatiga que pueden presentarse a cierta distancia de las soldaduras del cuerpo. Esto es un punto de preocupación para los inspectores de calderas, que periódicamente pedirán que se retire todo el aislamiento de la caldera y usarán una plantilla para determinar la exactitud de la curvatura del cuerpo de la caldera.

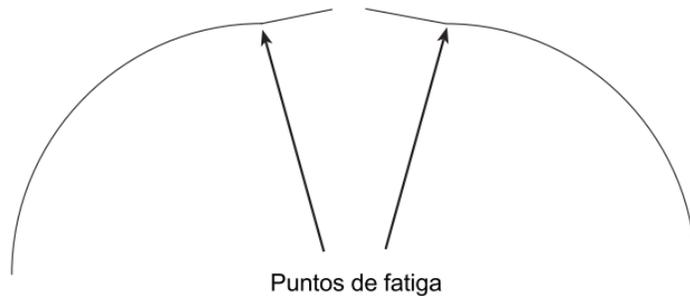


Figura N° 25 Puntos de fatiga del cuerpo de caldera

**Fuente : Spirax Sarco**

## **2.4 DIMENSIONAMIENTO DE SISTEMAS AUXILIARES:**

### **2.4.1 SISTEMA DE ALIMENTACION DE AGUA:**

La generación de vapor en la caldera va a depender de la cantidad de agua que se suministre, por lo que es recomendable que la cantidad de agua de reserva y la capacidad del tanque de alimentación sea de tal manera que almacene una cantidad mínima de agua lo suficiente para mantener la evaporación de la caldera por lo menos durante 20 minutos.

Por medios de datos experimentales se tiene que para satisfacer la demanda de 1 BHP se requieren 0.069 galones americanos por minuto o 0.261 litros por minuto.

$$Capacidad\ de\ Evaporacion = \frac{2 * BHP_{nominal} * 0.069\ Galon/minuto}{BHP} \dots \dots (24)$$

**a) CAPACIDAD Y DIMENSIÓN DEL TANQUE DE AGUA DE ALIMENTACIÓN.**

El tanque de almacenamiento de agua de alimentación recibirá el condensado que se forma después de que el vapor haya transferido calor en los diferentes procesos térmicos para los cuales se destinó.

Sí la reserva mínima de agua deberá satisfacer la evaporación en la caldera durante 20 minutos, se tiene:

$$\text{Reserva de agua} = \text{Capacidad de evaporacion} * 20 \text{ minutos} \dots (25)$$

Por otra parte el tanque de agua de alimentación no deberá estar nunca 100 % lleno, sino que solamente el nivel de agua debe cubrir el 70 % del volumen del tanque, con el fin de considerar el aumento de presión cuando haya un incremento de temperatura en el agua.

La reserva mínima será:

$$\text{Capacidad tanque de agua} = \frac{\text{Reserva de agua}}{\% \text{ de Volumen de tanque}} \dots (26)$$

Para la determinación de las dimensiones del depósito de agua se tiene en cuenta la siguiente relación:

$$L = 3 * D \dots (27)$$

Donde:

L = longitud del tanque.

D = Diámetro del tanque de agua.

Finalmente el volumen del tanque se cubica en función a la siguiente ecuación:

$$\text{Volumen} = \frac{3 * D^3 * \pi}{4} \dots \dots (28)$$

**b) CRITERIOS PARA LA SELECCIÓN DE BOMBAS DE AGUA DE ALIMENTACIÓN.**

La bomba de agua de alimentación succiona del tanque agua para llevarla hasta la caldera para generar el vapor. Para seleccionarla es necesario considerar los siguientes criterios:

- Operación continua e intermitente

La caldera a utilizar es de tubos de fuego, la operación de la bomba de agua de alimentación es de forma intermitente, o sea arrancando o parando dependiendo del nivel de agua, estas calderas trabajan generalmente con un flotador sobre el cual actúa un switch, por lo que hace que el motor que impulsa la bomba para o arranque a cierto nivel, debiendo dirigirse la tubería de descarga directamente hacia la caldera sin restricción en esta línea.

- Presión de descarga.

La presión de descarga de la bomba de agua de alimentación es siempre mayor que la presión de diseño de la caldera, un valor recomendable para la presión de descarga es de 0.35 a 1.76 kg/cm<sup>2</sup> (5 a 25 lb/pulg<sup>2</sup>) por encima de la presión de operación de la caldera.

- Capacidad

La capacidad de una bomba de agua de alimentación de calderas significa el caudal que una bomba puede proveer, pero siempre dependiendo también de la presión de descarga y de la carga neta de succión requerida.

Existen dos tipos de bombas utilizadas para el agua de alimentación: Tipo turbina y Tipo centrífuga.

Generalmente la bomba de tipo turbina es seleccionada para operación intermitente, con una capacidad de 1.5 a 2 veces la capacidad de evaporación de la caldera.

- La carga neta de succión positiva (NPSH)

Es la altura total absoluta de succión corregida al eje impulsor menos la presión de vapor del líquido, en cm o pies absolutos. La NPSH se refiere a un análisis de las condiciones de succión de la bomba, para saber si el agua se vaporiza o no en el punto de menor presión, debido a que se debe mantener el fluido en estado líquido para obtener un buen funcionamiento de la bomba evitando la cavitación debido a que este afecta a la presión, capacidad y eficiencia, que podría producir incluso perforaciones en la paletas del impulsor.

Para evitar este problema, es esencial para proporcionar la mejor posible de succión positiva neta (NPSH) a la bomba de manera que la presión estática es tan alta como sea posible. Esto se facilita mucho con la localización del tanque de alimentación lo más alto

Posible por encima de la caldera. El NPSH se determina con las curvas de la bomba a seleccionar.

- Detalles Técnicos:

La cantidad de agua que se necesita suministrar a la caldera para que este opere normalmente se la obtiene de la siguiente ecuación:

$$\text{Capacidad de Bombeo} = \frac{0.069 * BHP_{nominales} * \text{factor de encendido}}{G_e} \dots (29)$$

El factor de encendido tiene los siguientes valores

Bombas de turbinas=1.15 a 2

Bombas centrífugas=1.10 a 1.15

$G_e$ =Gravedad específica

La potencia del motor que impulsará la bomba se calcula con la siguiente ecuación:

$$P_{bomba} = \frac{\rho * g * H_b * Q}{1000} \dots (30)$$

Para el dimensionamiento de tuberías se utiliza la ecuación de continuidad modificada.

$$v_{agua} = \frac{Q}{A_{tubo}} \dots \dots (31)$$

#### 2.4.2 SISTEMA DE ALIMENTACION DE COMBUSTIBLE:

La selección del combustible deberá hacerse no solamente tomando en consideración su costo de adquisición, sino también la disponibilidad en el mercado durante todo el año, seguridad durante el transporte y almacenamiento, calidad y costo de operación. Para nuestro caso se selecciona el fuel oil, debido a las condiciones de trabajo que va a estar sometida la caldera.

- Calculo de Capacidad del Tanque:

Los tanques de combustibles pueden clasificarse:

Según su forma: Cilíndricos verticales, Cilíndricos horizontales y Rectangulares

Según su ubicación: aéreos y enterrados.

El material de construcción de los tanques para combustibles es acero al carbono, estos pueden ser instalados a una altura superior al que se encuentren los quemadores de la caldera.

El tanque de servicio diario deberá tener como mínimo una capacidad de almacenamiento para que el combustible pueda durar 24 horas de operación de las calderas. En los tanques de reserva debe tener como mínimo una capacidad de almacenamiento de tal magnitud que el combustible pueda durar de 15 a 30 días de tiempo de funcionamiento de las calderas.

Al utilizar tanques que según su clasificación serán cilíndricos horizontales y según su ubicación estarán sobre el piso. Para esto se utiliza la tabla para calcular las dimensiones de los tanques

CAPACIDAD (Gal)	DIÁMETRO MAX. (m)	ESPESOR MÍNIMO (mm)
Menos de 1321	1.5	3.5
1322 – 2642	1.85	4.0
2643 – 3963	2.33	4.5
3964 – 6605	2.65	5.0
6606 – 13210	3.16	6.5
13211 – 20000	4.0	8.0

Figura N° 26 Diámetros para tanques de combustible según su capacidad

Fuente : Libro de Calderas Industriales.

Para el tanque de servicio diario se tiene:

$$V_{comb.} = m_{nominal} * 24 \text{ horas ... (32)}$$

Las dimensiones del tanque se seleccionan según los valores de la figura N° 26.

El tanque de reserva tendrá una capacidad de almacenamiento de combustible para un mes de trabajo (25días), es decir 600 horas de operación de la caldera.

- Cálculo de la Bomba de Combustible.

Todas las calderas vienen provistas de bombas de combustible, y estas serán generalmente del tipo de desplazamiento positivo. Estas bombas son pequeñas de bajo peso y con una eficiencia mecánica entre 75 al 85 %.

Toda bomba tiene como características principales: Cabezal de descarga y Caudal volumétrico.

Primero se procede a calcular la potencia del motor eléctrico que se requiere para las condiciones del sistema, y luego analizar el resultado. La presión de descarga de la bomba para el Fuel oil puede fluctuar entre 75 a 100 psi dependiendo del arreglo de las tuberías del sistema de combustible. La potencia necesaria para impulsar la bomba de combustible se procede a calcularla utilizando la siguiente relación:

$$P_{bomba} = \frac{\rho_{petroleo} * g * H_b * Q_{petroleo}}{1000} \dots (33)$$

El tanque de almacenamiento como el del servicio diario tendrán un calentador eléctrico, para ser utilizado al momento de prender el caldero, o sea cuando aún no se genere el vapor para calentar el combustible. Para mover el combustible del tanque de servicio diario al quemador este tipo de caldera, se tiene que para operar la bomba de combustible el sistema toma fuerza del motor ventilador de tiro forzado con las siguientes características: 3HP de potencia, 230 V, 60 Hz.

$$Potencia\ termica\ suministrada = \dot{m}_{c\ nominal} * P_{ci} \dots (34)$$

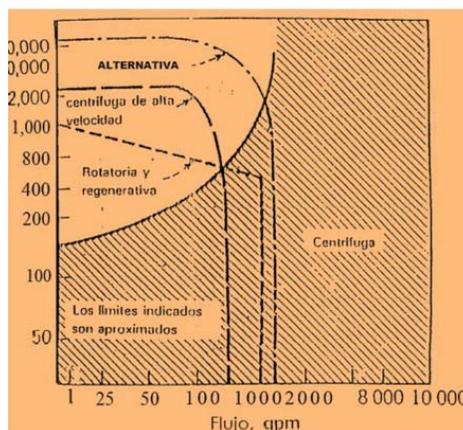


Figura N° 27 Selección de Bombas de acuerdo al flujo y presión requerida

Fuente : Libro de Calderas Industriales.

Dentro de las bombas tipos rotatorias se tiene las de engranajes internos, que es óptima para fluidos viscosos y adecuados para este sistema, la marca VIKING PUMP, recomienda el uso de este tipo de bombas para los requerimientos ya mencionados.

- Quemadores de Combustible.

Los quemadores de combustible de una caldera constituyen la parte final de todo sistema de combustible, siendo su función principal la de producir la atomización y regulación del combustible para quemarlo.

Los quemadores de combustible de los generadores de vapor se pueden clasificar básicamente de tres maneras: Quemadores con atomización por vapor, Quemadores con atomización por aire y Quemadores con atomización mecánica.

Las calderas Cleaver Brooks vienen con su quemador incorporado, es decir al seleccionar la caldera indirectamente se está seleccionando el quemador requerido, ya que los fabricantes incluyen al quemador así como también el panel de control, control de llama, y otros accesorios. A continuación se describe de manera rápida un quemador seleccionado.

El quemador es del tipo de baja presión atomizado por aire (boquilla).

El quemador se enciende por medio de una chispa generada por un piloto de gas, el piloto es del tipo interrumpido y se apaga después que se ha establecido la llama principal. La secuencia de la operación del quemador, desde que se enciende hasta que se apaga, está controlada por el relevador de programación en conjunto con los dispositivos de operación, limitador y entrecierre, los cuales están conectados al circuito para proporcionar una operación segura y proteger contra técnicas incorrectas de operación.

Conjunto del quemador: Las partes esenciales de un quemador son las siguientes:

Ventilador: Unidad que provee aire en el volumen y la presión adecuada para la combustión.

Compresor: Provee aire a mayor presión para atomizar el combustible.

Sistema de ignición: Por medio de un transformador de alto voltaje produce la chispa en los electrodos para iniciar la combustión.

Control de llama: Una célula fotoeléctrica detecta la existencia de la llama y en su defecto corta el combustible y apaga la caldera.

Bomba de combustible: Provee la presión necesaria para llevar el combustible hasta las boquillas del quemador.

### **2.4.3 CARACTERISTICAS DE LA CHIMENEA:**

La chimenea tiene por misión la conducción de los gases de la combustión desde la caldera hasta el exterior, por lo que la chimenea debe tener el tiro suficiente para vencer la resistencia del paso de los humos a través de la caldera y la resistencia de la chimenea.

Para la combustión efectiva y completa del combustible, es necesario un caudal adecuado de aire y se generará una determinada cantidad de humos, el flujo se crea y se mantiene por medio de la chimenea y de los ventiladores, o bien la chimenea por sí sola o la combinación de chimenea y de los ventiladores producen la caída de presión necesaria para mantener el flujo.

Se llama TIRO a la diferencia entre la presión en el lado exterior de la pared (atmosférica) y la presión estática en el lado interior de la pared del conducto o la chimenea por donde circulan los productos de la combustión en el hogar. El flujo de aire – humos a través de la caldera se puede conseguir de tres maneras denominadas: Tiro forzado, tiro inducido y tiro natural.

Una caldera de TIRO FORZADO funciona con el hogar a una presión superior a la atmósfera, un sistema de ventiladores situados a la entrada de la caldera, fuerza el aire hacia el interior con la presión suficiente para compensar la caída producida en el total del circuito de aire-humos, hasta la salida de la chimenea.

Una caldera de TIRO INDUCIDO funciona con una presión en el hogar interior a la presión atmosférica. La presión va disminuyendo desde la entrada pasando por el hogar y conducto de salida de humos, hasta un sistema de ventiladores, llamados ventiladores inducidos, que aspiran del hogar y envían los productos de combustión hacia la chimenea.

Cuando la caldera es pequeña, el tiro se puede conseguir por el efecto de la chimenea, sin que sea necesario ningún tipo de ventilador y en tal caso la caldera se llama de TIRO NATURAL.

Se procede a calcular las dimensiones de la chimenea haciendo uso de las figuras siguientes, asumiendo una determinada temperatura de salida de la chimenea. Se hace aproximaciones de los valores según sea necesario, por verificación de la temperatura de salida, las pérdidas de flujo y corrección por altura, si es necesario.

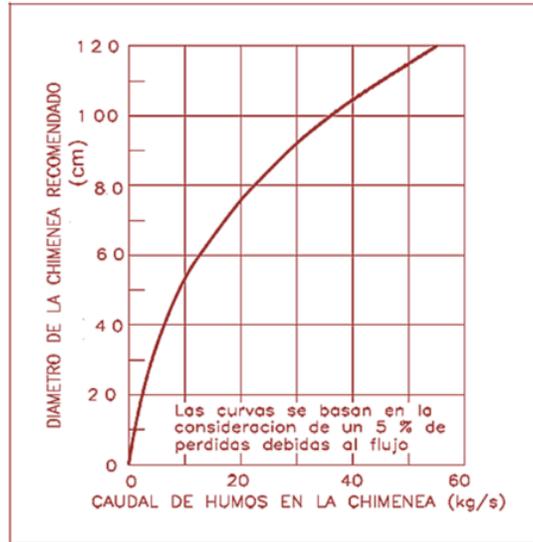


Figura N° 28 Diámetro recomendado de chimeneas

Fuente : Libro de Calderas Industriales.

Para aproximar la altura se hace uso de la figura 29.

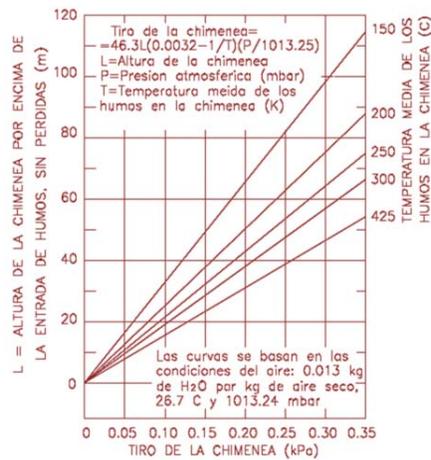


Figura N° 29 Altura de la chimenea en función al tiro

Fuente : Libro de Calderas Industriales.

Con la altura y diámetro de la chimenea se puede calcular el tiro real de la chimenea por medio de la siguiente tabla:

TEMPERATURA DE HUMOS		VOLUMEN ESPECIFICO HUMOS m <sup>3</sup> /kg	TEMPERATURA DEL AIRE, K			
			277.55	288.75	299.85	310.95
C	K		VOLUMEN ESPECIFICO DEL AIRE, m <sup>3</sup> /kg			
			0.78872	0.82055	0.85209	0.88363
121.1	394.25	1.08352	3.38543	2.90279	2.46004	2.04890
260	533.15	1.46526	5.74515	5.26252	4.81976	4.40862
537.8	810.95	2.22874	8.03955	7.55691	7.11416	6.70302
815.5	1088.65	2.99195	9.16279	8.68016	8.23740	7.82626
1093.6	1366.75	3.75626	9.83022	9.34758	8.90483	8.49369
1371.1	1644.25	4.51891	10.27116	9.78853	9.34578	8.93464

Figura N° 30 Tiro de la chimenea en (Pa-m)

Fuente : Libro de Calderas Industriales.

#### Materiales Constructivos.

Los materiales de la chimenea en contacto con los humos deben ser resistentes a las altas temperaturas y a las posibles corrosiones ácidas (corrosión de extremo frío causada por ácido sulfúrico), que se originan. Los materiales pueden ser refractarios, de material cerámico, de acero inoxidable u otro material idóneo, no se debe utilizar ladrillo normal ni tampoco acero galvanizado.

#### Diseño.

La chimenea debe ser de sección constante en todo su recorrido, pudiendo ser rectangular, cuadrada, circular u ovalada. En la salida de la chimenea no debe haber edificaciones cercanas, en la base vertical debe haber un fondo de saco con registro para el depósito de hollines y agua de lluvia, en el conducto de conexión de la caldera a la chimenea es conveniente colocar una compuerta para la regulación del tiro.

## 2.5 CRITERIOS DE DISEÑO Y FABRICACION.

### 2.5.1 DISEÑO.

La Secc VIII Div1 y Div 2 del Código, son parte de los denominados Códigos de Construcción de ASME. Los mismos contienen todo lo concerniente al diseño, la fabricación y el correspondiente control. A su vez, también hacen referencia a las fuentes de consulta sobre aspectos específicos tales como Materiales, Soldaduras y

Ensayos no Destructivos, a los que denomina Códigos de Referencia. Estos son: Secc.II: Materiales – Secc.V: Ensayos no Destructivos – Secc.IX: Calificación de Soldaduras, los que también deben ser cumplidos por los Fabricantes en la medida que el Código de Construcción invoque determinado requerimiento y remita al Código de Referencia correspondiente. Si bien, en la gran mayoría de los casos se diseña y fabrica bajo la Secc VIII Div1, también se dispone de la Div 2: Reglas Alternativas; esta Norma permite el diseño por Análisis de Tensiones, resultando muy necesaria para el cálculo de grandes recipientes, espesores gruesos de pared, condiciones de servicio severas, etc.

El criterio de diseño utilizado por la Secc VIII Div 1, establece que el espesor de pared de un recipiente a presión, deberá ser tal que las tensiones generadas por la presión, no deben exceder el valor de la tensión admisible del material.

La tensión admisible a la tracción para cada material, resultará de dividir por 3,5 a la tensión de rotura de ese material a la temperatura de diseño. No obstante que los valores de tensión de rotura que figuren en los certificados de Usina ó que resulten de ensayos posteriores, tengan valores por arriba del valor que para ese material y esa temperatura se establece en la Secc.II, este último es a partir del cual se tomará la tensión admisible a utilizar en el cálculo.

La presión de trabajo máxima permitida, estará limitada por la envolvente ó los cabezales y no por partes menores.

Los recipientes cubiertos por la Secc. VIII Div1, serán diseñados para las mas severas condiciones coincidentes de presión y temperatura previstas para las condiciones normales de operación que le son requeridas. Consecuentemente, la presión de diseño será la máxima de trabajo admitida por el recipiente sin que se supere la tensión admisible del material en el punto más comprometido.

Los recipientes sometidos a presión, deberán ser diseñados para poder soportar las tensiones debidas a las cargas ejercidas por la presión interna ó externa, el peso del recipiente lleno de líquido y toda otra sollicitación que agregue tensiones sobre las partes que lo componen.

### 2.5.2 FABRICACION.

El Fabricante deberá desarrollar los planos constructivos necesarios a partir de la documentación de diseño.

- Las envolventes deberán ser roladas con un diámetro coincidente con el de transición de los cabezales.
- En recipientes con cabezales de diferente espesor que la envolvente se efectuará la transición de espesores sobre el exterior del recipiente. La longitud de transición nunca será menor que 3 veces la diferencia de espesores. Los cordones longitudinales de las envolventes serán ubicados de manera de no ser afectados por aberturas, placas de refuerzo, cunas de apoyo, etc y permanecer perfectamente visibles.
- Para los cordones circunferenciales son válidas las mismas consideraciones pero, si una interferencia es inevitable, el cordón será rebajado a rás de la chapa y examinado radiográficamente previo a la colocación del refuerzo.
- No se permitirá ninguna conexión roscada directamente sobre la envolvente ó cabezales, cualquiera fuere su espesor.
- Toda conexión que no se prolongue hacia el interior del tanque, terminará a rás de la cara interna y la soldadura se efectuará con penetración completa.
- Los refuerzos de conexiones y entradas de hombre, deberán ser calculados conforme lo especifica el Código. El material del refuerzo será el mismo tipo de acero que el utilizado en el recipiente.
- Los bordes interiores de las entradas de hombre ó de mano, serán amoladas con un radio mínimo de 6 mm.
- Para conexiones de  $\varnothing 2''$  ó menores, es recomendable la utilización de cuplas ó medias cuplas forjadas de serie 3000 como mínimo; las de  $2\frac{1}{2}''$  y mayores deberán ser bridadas de tipo SORF de Serie 150 como mínimo y para servicios de mayor presión, el tipo WNRF de la Serie que corresponda. Los cuellos de conexión para diámetros menores a  $1\frac{1}{2}''$  serán sch 80 y la conexión al cuerpo se realizará mediante accesorios socked weld.

### 2.5.3 SOLDADURA.

El Fabricante no podrá comenzar a soldar hasta que el Procedimiento de Soldadura calificado y la Habilidad del Soldador/Operador, sean aprobados por la Inspección del Adquirente.

- Todas las soldaduras se realizarán en un todo de acuerdo con las norma A.W.S. (American Welding Society) en cuanto a los materiales de aporte utilizados y con el Código ASME Sección VIII y IX en lo referente a métodos y procedimientos de soldadura.
- Para la soldadura de envoltorio y casquetes se utilizará la forma “a tope” de penetración y fusión completa. El procedimiento de soldadura mas moderno seguro y rápido es el de Arco Sumergido (S.A.W) ó soldadura Automática.
- Una de las prácticas mas comunes para soldadura de ambos lados es, con bisel en X (2/3 ext./1/3 int.), realizando desde la cara interna la soldadura que hará de respaldo al S.A.W . Este respaldo, se realizará mediante procedimiento manual con electrodo revestido (S.M.A.W.), efectuando las pasadas necesarias s/espesor (s) ó bien con Semiautomática de alambre macizo (G.M.A.W.) ó tubular (F.C.A.W), en ambos casos con el modo de transferencia globular. Posteriormente, repelada la raíz, se efectuarán las pasadas externas de S.A.W. que sean necesarias para completar la soldadura. Si no es posible el acceso al interior del tanque, se utilizará bisel del tipo “V”, para soldar totalmente desde el exterior. Para este tipo de soldadura, es imprescindible utilizar un procedimiento adecuado que asegure la completa penetración; a este efecto, la raíz se efectuará preferentemente con el procedimiento TIG (G.T.A.W.) ó bien con S.M.A.W. utilizando el clásico electrodo celulósico 6010. Eventualmente se podrá colocar un anillo interno de respaldo que quedará incorporado en forma permanente a la soldadura al soldar desde el exterior con el S.A.W. ó con otro procedimiento. En todos los casos, los procedimientos, siempre deberán estar calificados bajo ASME IX. Las restantes uniones menores (conexiones, refuerzos, etc) podrán realizarse con S.M.A.W ó G.M.A.W., utilizando material de aporte acorde a lo especificado por A.W.S.
- Para cada forma y tipo de junta que se adopte y según sea el grado de control radiográfico que se efectúe, el Código ASME establece el valor de la eficiencia de junta E que interviene en el denominador de la fórmula de cálculo del espesor de pared del recipiente. Para el mismo tipo de junta, a mayor control mayor será el E permitido y

consecuentemente, menor será el espesor mínimo requerido (ver UW-12 ASME VIII Div.1)

#### **2.5.4 PRUEBA HIDROSTÁTICA:**

Es la aplicación de una presión a un equipo o línea de tuberías fuera de operación, con el fin de verificar la hermeticidad de los accesorios bridados y la soldadura, utilizando como elemento principal el agua o en su defecto un fluido no corrosivo. Todo equipo nuevo debe ser sometido a una prueba de presión (hidrostática), en los talleres o de la misma forma se realiza en campo en caso de una construcción, o proyecto industrial.

Los códigos de diseño de los equipos y sistemas de tuberías (ASME, API, TEMA, BS, entre otros), establecen claramente las prácticas recomendadas de cómo realizar la prueba hidrostática, con el fin de garantizar la integridad física de las personas y los equipos.

Por lo general, un equipo que haya sido probado en los talleres del fabricante no debería ser probado nuevamente después de su instalación, a menos que sea requerido por algunas de las autoridades locales o si existe alguna sospecha de que el equipo haya sufrido algún daño durante el transporte, por lo que la prueba se llevará efecto de acuerdo al código de diseño o a las especificaciones del caso.

La prueba hidrostática también aplica cuando se reemplaza o se reparan líneas existentes. La prueba hidrostática nos permite:

- Determinar la calidad de la ejecución del trabajo de fabricación o reparación de la línea o equipo.
- Comprobar las condiciones de operación para garantizar la seguridad tanto de las personas como de las instalaciones.
- Detectar fugas.

**NORMALIZACIÓN PARA REALIZAR LA PRUEBA HIDROSTÁTICA:** Para realizar las pruebas hidrostáticas se requiere utilizar un sistema de tuberías según las normas técnicas ASME, ANSI y API.

Se tienen las siguientes especificaciones de normas que aplican según el caso y la respectiva utilización de cada una.

Tipo de norma: Aplicada en:

- ANSI B31.1  
ASME SECCION 1 Líneas de vapor plantas eléctricas, plantas de GLP, gabarras.  
Transporte de vapor, agua, aceite y en los sistemas de tuberías externos de las calderas.
- ANSI B31.2 Transporte de gas combustible.
- ANSI B31.3  
API RP – 14E Transporte de gas, vapor, agua, aire, productos químicos, aceites y otros productos del petróleo.  
Estaciones de flujo, múltiples de producción y verticales.

#### CONSIDERACIONES TÉCNICAS PARA REALIZAR LA PRUEBA HIDROSTÁTICA:

- Tomar en consideración que la presión de prueba en una sección de una línea no debería exceder de la máxima presión permitida en cualquier componente instalado en la línea e incluido en la sección en prueba.
- Una vez que la prueba haya sido establecida o determinada, es importante asegurarse que tal presión no sea excedida durante la prueba. Comprobar que la resistencia (espesor y material) de los discos ciegos sea la adecuada, de acuerdo con la presión de la prueba hidrostática que se va a ejecutar.
- En el caso de los hornos cuando se hayan realizado reparaciones o reemplazados de tubos, el serpentín del horno o las secciones e tubería deben ser probados hidrostáticamente. Solamente cuando haya efectuado la limpieza del serpentín, por razones operacionales, una prueba de hermeticidad con vapor será suficiente para chequear tapones y cabezales.
- En caso de fugas por tapones, no tratar de ajustarlos durante la prueba hidrostática. Un falso movimiento y la energía acumulada en el sistema puede expulsar el tapón a alta velocidad y causar daños irreparables a personas o instalaciones.
- Inspeccionar para detectar posibles fugas en la zona de expansión o expandido de los tubos por la parte externa del cabezal, mientras los tubos están bajo

presión. Esta inspección visual puede ser facilitada por el uso de un espejo colocado entre el cabezal y el soporte final de la pared del tubo, obteniendo así una vista de la unión.

- La duración de la prueba deberá ser de una (1) hora como mínimo, de manera que se tenga el suficiente tiempo para permitir la inspección correspondiente.

#### **2.5.5 PUESTA DE OPERACIÓN EN FRÍO:**

Los arranques en frío suponen una carga mecánica considerablemente mayor para las calderas piro-tubulares que el funcionamiento normal. En la primera puesta en marcha, el arranque en frío es inevitable. Sin embargo, también pueden tener lugar procesos similares al arranque en frío tras la primera puesta en marcha, por ejemplo, tras largos periodos de parada o en sistemas de varias calderas con control secuencial sin mantenimiento de presión y temperatura. Estos se caracterizan por la ausencia de ebullición del agua en la caldera. Por ejemplo, si el agua tiene una temperatura de 20 °C aprox. en la primera puesta en marcha, está 80 °C más fría que con una presión absoluta de 1 bar de agua en ebullición.

La causa de la elevada carga mecánica en los arranques en frío es la diferencia de temperatura considerablemente más alta en comparación con el funcionamiento normal entre el hogar de combustión y el envolvente de la caldera. Por ello, el hogar de combustión se dilata relativamente respecto al envolvente de la caldera notablemente más que en el funcionamiento normal. Esto provoca entre el hogar de combustión y el envolvente de la caldera o el hogar de combustión y los tubos de humos frío un esfuerzo mecánico considerablemente mayor de los correspondientes elementos de conexión y de anclaje, como la conexión del suelo al hogar de combustión, los tubos de anclaje, conexiones de la cámara de retorno al hogar de combustión, el anclaje angular, etc.

#### **PROCEDIMIENTO PARA ENCENDER UN CALDERO CON PETROLEO:**

- Revisar que la caldera tenga agua hasta su nivel normal y que la bomba que alimenta el agua este trabajando bien.
- Arrancar la bomba que alimenta el diesel o petróleo residual y que tenga una presión de 4 a 5 Kg. en sus manómetros.

- Checkear visualmente que no haya fuga de agua o combustible en las tuberías y mangueras de la caldera, y revisar si el tanque de gas propano para el encendido primario esté conectado a la línea de servicio.
- Si va a encenderse con petróleo residual, poner el switch que energiza las resistencias electrónicas que están instaladas donde está el equipo de bombas que alimentan el petróleo a la caldera y revisar si los termómetros están en la temperatura de 60° a 85°C. en caso de que la temperatura no alcance esos grados, energice las resistencias que están en el circuito eléctrico de la caldera.
- Efectuando los puntos anteriores se procede a encender el switch de arranque de la caldera y abrir las válvulas del tanque de gas butano y las del aire del compresor. La presión de aire deberá de ser de 1.5 a 2 Kg. Una vez energizado el circuito de arranque, inspeccionar visualmente el movimiento del motor modulador que mueve el varillaje que abre la compuerta de entrada del aire que hace el barrido de gases dentro de la caldera y a la vez abre o cierra la válvula reguladora del petróleo.

## **2.6 ANALISIS ECONOMICO:**

### **2.6.1 INVERSION:**

En el contexto empresarial, la inversión es el acto mediante el cual se invierten ciertos bienes con el ánimo de obtener unos ingresos o rentas a lo largo del tiempo. La inversión se refiere al empleo de un capital en algún tipo de actividad o negocio, con el objetivo de incrementarlo. Dicho de otra manera, consiste en renunciar a un consumo actual y cierto, a cambio de obtener unos beneficios futuros y distribuidos en el tiempo. Desde una consideración amplia, la inversión es toda materialización de medios financieros en bienes que van a ser utilizados en un proceso productivo de una empresa o unidad económica, y comprendería la adquisición tanto de bienes de equipo, como de materias primas, servicios etc. Desde un punto de vista más estricto, la inversión comprendería sólo los desembolsos de recursos financieros destinados a la adquisición de instrumentos de producción, que la empresa va a utilizar durante varios periodos económicos.

En el caso particular de inversión financiera, los recursos se colocan en títulos, valores, y demás documentos financieros, a cargo de otros entes, con el objeto de aumentar los

excedentes disponibles por medio de la percepción de rendimientos, intereses, dividendos, variaciones de mercado, u otros conceptos.

Para el análisis económico de una inversión puede reducirse la misma a las corrientes de pagos e ingresos que origina, considerado cada uno en el momento preciso en que se produce.

Las cantidades dedicadas para inversiones de los agentes dependen de varios factores. Los tres factores que condicionan más decisivamente a esas cantidades son:

- Rendimiento esperado, positivo o negativo, es la compensación obtenida por la inversión, su rentabilidad.
- Riesgo aceptado, la incertidumbre sobre cuál será el rendimiento real que se obtendrá al final de la inversión, que incluye además la estimación de la capacidad de pago (si la inversión podrá pagar los resultados al inversor).
- Horizonte temporal, a corto, mediano, o largo plazo; es el periodo durante el que se mantendrá la inversión.

El presupuesto de producción se vincula al presupuesto de venta, ya que consiste en calcular cuánto costará fabricar la cantidad de productos que una firma prevé vender. Esto permite analizar los costos y cotejarlos con los ingresos y las ganancias que se esperan obtener.

El presupuesto tiene los siguientes componentes:

$$\begin{aligned} \text{Costo Total de Produccion} \\ = \text{Costo de Material} + \text{Costo de M. O} + \text{Costo por Instrumentacion} \\ + \text{Inspeccion y pruebas} + \text{Supervision} \dots (35) \end{aligned}$$

EL COSTO DEL MATERIAL: está referido a los materiales o suministros son los elementos básicos que se transforman en productos terminados a través del uso de la mano de obra y de los costos indirectos de fabricación en el proceso de producción.

Los costos de los materiales puede ser directos o indirectos, los materiales directos son aquellos que pueden identificarse con la producción de un artículo terminado, que pueden asociarse fácilmente al producto y que representan un costo importante del producto terminado. Ej: el acero utilizado en la fabricación de automóvil.

Los materiales indirectos son los demás materiales o suministros involucrados en la producción de un artículo que no se clasifican como materiales directos. Ej: el pegamento que se emplea en la fabricación de muebles. Los materiales indirectos son considerados como costos indirectos de fabricación.

**CAPITULO III:**  
**MATERIALES Y METODO**

### **3.1 MATERIALES:**

#### **3.1.1 SUSTANCIAS.**

- **VAPOR SATURADO.**

El estado de vapor es la fase gaseosa de una sustancia cuando ésta se encuentra por debajo de su temperatura crítica (el estado de vapor es un estado de agregación de la materia en el que las moléculas interactúan sólo débilmente entre sí, sin formar enlaces moleculares adoptando la forma y el volumen del recipiente que las contiene y tendiendo a separarse, esto es, expandirse, todo lo posible). Se denomina saturado cuando no contiene ningún porcentaje de humedad en su masa.

- **LIQUIDO COMPRIMIDO.**

Se denomina así a un líquido que está sometido a una presión mayor que a presión de equilibrio líquido – vapor correspondiente a la temperatura a que se encuentra.

- **GASES DE LA COMBUSTION.**

Son el resultado la combustión de las materias combustibles, como gasolina/petróleo, Diesel o carbón. En las combustiones localizadas y controladas, se descargan a la atmósfera a través de una tubería o chimenea.

Aunque gran parte de los gases de combustión está compuesto por el relativamente inofensivo dióxido de carbono y por agua en forma de vapor, también contiene sustancias nocivas o tóxicas como el monóxido de carbono (CO), hidrocarburos (HC), óxidos de azufre (SOx), más raramente óxidos de nitrógeno (NOx) y aerosoles.

- **PETROLEO R500.**

Son combustibles residuales para uso industrial obtenidos de los procesos de refinación del petróleo crudo . Cumple con la Norma Técnica Peruana y con el estándar internacional ASTM D-396. Viscosidad acorde a las especificaciones de los equipos, en lo que respecta a bombas, filtros y características de los quemadores.

Máximo poder calorífico, importante para el cálculo del balance y costo energético del producto. Los petróleos industriales que Petroperú comercializa presentan elevado poder calorífico.

Bajo contenido de azufre respecto a la especificación vigente, lo que minimiza los problemas de corrosión en el sistema de combustible.

### **3.1.2 EQUIPAMIENTO.**

### **3.1.3 SOFTWARE.**

Para la elaboración de los planos de detalle de la vista frontal, vista posterior, se utilizara el siguiente programa:

- **AUTOCAD.**

Autodesk AutoCAD es, como lo indica su nombre, un software CAD utilizado para dibujo 2D y modelado 3D. Actualmente es desarrollado y comercializado por la empresa Autodesk. El nombre AutoCAD surge como creación de la compañía Autodesk, en que Auto hace referencia a la empresa creadora del software y CAD a Diseño Asistido por Computadora (por sus siglas en inglés "Computer Aided Design").

AutoCAD es un software reconocido a nivel internacional por sus amplias capacidades de edición, que hacen posible el dibujo digital de planos de edificios o la recreación de imágenes en 3D; es uno de los programas más usados por arquitectos, ingenieros, diseñadores industriales y otros.

- **MS OFFICE.**

Microsoft Office es una suite de oficina que abarca el mercado completo en Internet e interrelaciona aplicaciones de escritorio, servidores y servicios para los sistemas operativos Microsoft Windows y Mac OS X. Microsoft Office fue lanzado por Microsoft en 1989 para Apple. De este entorno se utilizara :

MS WORD : Para la redacción del informe de tesis.

MS EXCEL : Para la elaboración de gráficos , cuadros y presupuestos.

- **STEAM TABLE (FIGENER S/A)**

Software para cálculo de propiedades termodinámicas de Steam.

FIGENER ha desarrollado y puesto a disposición de los usuarios interesados un software para el cálculo de las propiedades termodinámicas del vapor. El software se llama tabla de vapor y se basa en las ecuaciones desarrolladas por el "IFC 1967 Formulación para uso industrial" .

Steam muestra valores de las Tablas de entalpía , entropía y el volumen específico del vapor una vez la presión y la temperatura y para vapor sobrecalentado o regiones líquidos comprimidos. Para la región de saturación, o bien la presión y la calidad o la temperatura y la calidad deben ser suministrados. Mollier , Ts y Th diagramas se dibujan , lo que permite la visualización de los puntos de entrada.

### 3.2 METODO DE INVESTIGACION:

3.2.1 **DISEÑO ENERGETICO.** Se determina las características energéticas del sistema de generación de vapor saturado, teniendo en cuenta la siguiente secuencia:

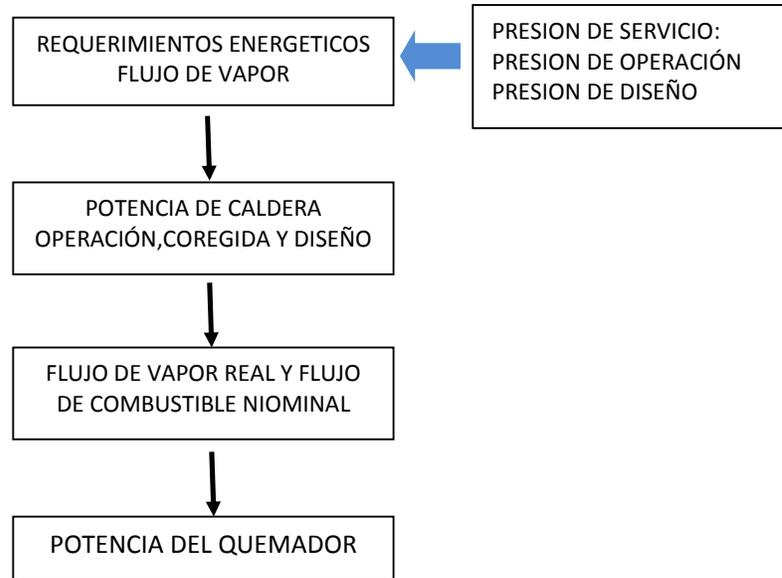


Figura N° 31 Diseño energético según presiones requeridas

Fuente : Elaboración propia

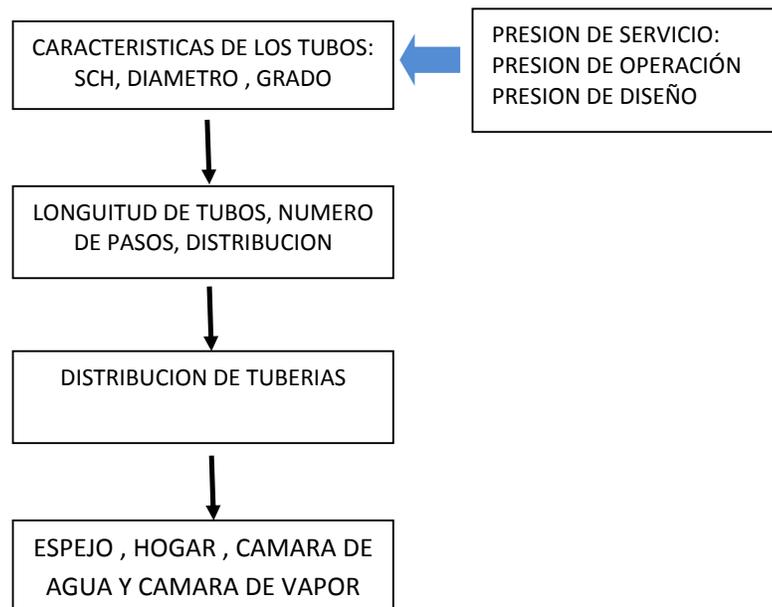


Figura N° 32 Secuencia metodológica de componentes del caldero

Fuente : Elaboración propia

### 3.2.2 DISEÑO MECANICO.

Se determinan los esfuerzos mecánicos a los que están sometidos los componentes fijos del caldero ,tal como los esfuerzos de tracción hacia la parte interna del cilindro del caldero , y los esfuerzos de compresión sobre los tubos da cada paso.

Se tienen en cuenta la caída de presión de los gases de la combustión en cada uno de los pasos que conforman el caldero según cada uno de los componentes: en el flue o cámara de combustión, haces tubulares y en contracciones y expansiones abruptas o secciones de cambio de paso.

### 3.2.3 COMPONENTES AUXILIARES.

Se seleccionan los componentes principales de:

SISTEMA DE ALIMENTACION DE AGUA:

Se determinan las características de :

- Dimensiones del tanque de alimentación de agua , teniendo los siguientes criterios:  
Altura de ubicación del tanque de agua : 10.4 metros sobre el nivel , equivalente a 1 Bar de presión ,con la finalidad de garantizar una temperatura cercana a los 100 °C del agua de alimentación.

Las características del tanque de agua son función de la siguiente ecuación:

$$Longitud = 3 * diametro \dots \dots (38)$$

- Determinación de la Potencia de la Bomba de suministro de agua al caldero:  
Se hace uso de la ecuación de continuidad para la determinación de la velocidad del agua dentro de una tubería.

$$Q = Area * velocidad \dots \dots (39)$$

Se hace uso de la ecuación de Bernoulli entre 2 puntos dentro de un sistema que incluye perdidas longitudinales y por accesorios , asi como una bomba centrífuga.

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 + H_B = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 + H_F \dots \dots (40)$$

Para la determinación de las pérdidas longitudinales se hace uso de la Ecuación de Darcy Weisbach.

$$H_{ps} = f * \frac{L * v^2}{2 * D * g} \dots \dots \dots (41)$$

CHIMENEA: Se determina la sección de paso de la chimenea en función a la siguiente ecuación:

$$A = \frac{m_g}{v * \rho_g} * \left( \frac{273 + T_g}{273} \right) m^2$$

Donde:

$m_g$  : es el flujo másico de los gases de la combustión.

$\rho_g$  : Densidad de los gases de la combustión.

$v$  : es la velocidad media de los gases de la combustión.

$T_g$  : es la temperatura de los gases de la combustión en la chimenea.

Para la determinación de la altura de la chimenea se hace uso de la siguiente ecuación:

$$A = \frac{k * N}{\sqrt{H}} \dots \dots \dots (42)$$

### 3.2.4 PRUEBAS Y ENSAYOS.

Se presentan las pruebas de ensayo : hidrostática y de arranque en frío para verificar las condiciones constructivas y para dejar operativa la caldera en su primer arranque.

### 3.2.5 ANALISIS ECONOMICO.

Se determina el valor de la inversión construcción del caldero seleccionad0o.

**CAPITULO IV:**  
**CALCULOS Y DISCUSION DE**  
**RESULTADOS**

#### 4.1 DISEÑO ENERGETICO

##### 4.1.1 CONSIDERACIONES DE CÁLCULO:

Se debe tener en cuenta los requerimientos de vapor saturado de la empresa según la siguiente figura:

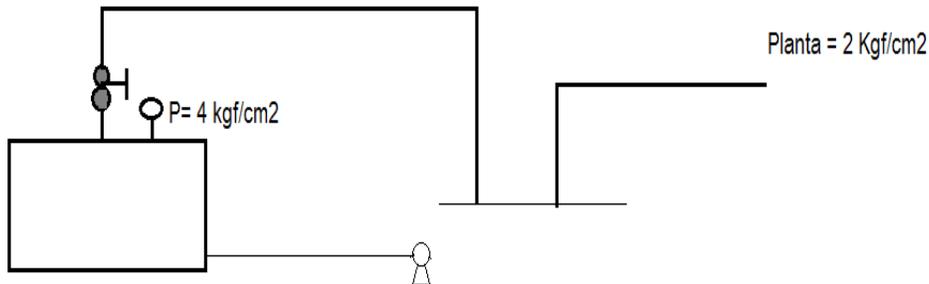


Figura N°33 Esquema de suministro de vapor saturado

Fuente: Elaboración propia

Presión de servicio 2 kgf/cm<sup>2</sup>

Presión de generación 4 kgf/cm<sup>2</sup> (Aplicando el 100 % de la presión de servicio o de operación)

Producción de vapor 2 Ton/h de vapor saturado.

Selección de la presión de diseño: 6 kgf/cm<sup>2</sup> o 6 Bar (50 % de la presión de generación de vapor.)

##### 4.1.2 DETERMINACION DE LOS BHP DE DISEÑO Y POTENCIA TERMICA:

###### a. CALCULOS PRELIMINARES

- Salida de vapor saturado 6 bar.

$$h_2 = 2,755.5 \text{ kj/kg}$$

- Entrada líquido comprimido. (Para la presión de entrada se asume el doble de la presión de diseño, en este caso 12 bar, la cual será la presión de bombeo y una temperatura de 90°C, el cual será el valor de la temperatura del agua ingresante al caldero)

$$h_1 = 377.8 \text{ kj/kg}$$

- Determinando los BHP previos:

$$BHP_{operacion} = \frac{2,000 * (2,755.5 - 377.8)}{8437 * 4.18} = 134.84 \text{ BHP}$$

Teniendo en cuenta un factor de seguridad de 1.2, con el cual el factor de carga es de 80% se determina los BHP nominales o Potencia nominal del equipo, según la ecuación N° 8:

$$BHP_{corregido} = 134.84 * 1.2 = 161.81 \text{ BHP}$$

El BHP de diseño lo obtenemos en función a un valor comercial, en este caso : 200 BHP.

- Verificación del flujo de vapor de diseño (Aplicando la ecuación N° 10)

$$\dot{m}_v \text{ nominal} = \frac{8437 * BHP_{diseño}}{(h_2 - h_1)} = \frac{8437 * 200 * 4.18}{(2,755.5 - 377.8)} = 2,966.5 \text{ kg/h}$$

Se tiene un factor de seguridad en la generación de vapor saturado de:

$$\text{Factor de seguridad de generacion} = \frac{2,966.5 - 2,000}{2,000} * 100\% = 48.3 \%$$

#### b. POTENCIA TERMICA DEL QUEMADOR:

- Determinación de la potencia térmica nominal del quemador.

El tipo de combustible a utilizar es Petróleo R500 con un poder calorífico de 42,301.6 kJ/kg, asumiendo la eficiencia del caldero piro-tubular de 200 BHP igual a 85%.

$$\dot{m}_c \text{ nominal} = \frac{\dot{m}_v \text{ nominal} * (h_2 - h_1)}{Pci * \eta_{nominal}} * 100\%$$

$$\dot{m}_c \text{ nominal} = \frac{2,966.5 * (2,755.5 - 377.8)}{42,301.6 * 85 \%} * 100\% = 196.16 \text{ kg/h}$$

$$\dot{m}_c \text{ nominal} = 0.0544 \text{ kg/sg}$$

Luego la potencia calorífica del quemador es:

$$Potencia_{quemador} = 0.0544 * 42,301.6 = 2,301.2 \text{ KW}$$

Se selecciona un quemador para gas natural ECOFLAM 300.1 con las siguientes características:

Presion<sub>máxima</sub> : 14 mbar

Potencia<sub>máxima</sub>: 3,000 KW

Potencia<sub>operacion</sub>: 2,300 KW

Potencia<sub>minima</sub>: 1,00 KW

Motor del ventilador: 4 KW



Figura N° 34 Quemador ECOFLAM 300.1

Fuente: ECOFLAM

#### 4.1.3 SELECCIÓN DE COMPONENTES SOMETIDOS A PRESION.

- SELECCIÓN DEL NUMERO DE CEDULA : Según la ecuación N° 12.

$$Numero \ Sch = 1000 * \frac{Presion \ de \ diseño}{Esfuerzo \ del \ material} = 1000 * \frac{6}{176} = 34$$

El Numero de Cedula más próximo es el Sch 40.

Para nuestro caso seleccionaremos tubería de acero de 2" de diámetro nominal catalogo o Sch 40 ASTM A 512 en donde el diámetro externo es 60.325mm y el diámetro interno es 52.5018mm, con un espesor de 3.9116mm y un peso de 5.45Kg/m.

- CARACTERISTICAS DEL BANCO DE TUBOS:

Seguidamente seleccionamos la longitud de la tubería para el caldero de baja potencia, aplicado la siguiente ecuación:

$$L_{tubos} (m) = (0.048 * 200) + 0.3 = 9.9 m$$

Asumimos un caldero de tres pasos: dos bancos de tubos y una de la cámara del quemador u hogar. Calculamos la longitud de las tuberías por paso:

$$L_{paso} = \frac{9.9}{2} = 4.95 m$$

Calculamos el área lateral de cada tubo:

$$A_{c/tubo} = \pi * D_{exterior} * L_{tubo} = 3.1416 * 0.060325 * 4.95$$

$$A_{\frac{c}{tubo}} = 0.938 m^2$$

Posteriormente determinamos el área total de transferencia de calor del cual utilizaremos la siguiente ecuación para caldero de baja potencia.

$$A_{calefaccion} = 0.465 * 200 - 0.004 = 92.96 m^2$$

Calculamos el número de tuberías, según la ecuación N° 16:

$$N_{tubos} = \frac{92.96}{0.938} = 99.14 = 100$$

Calculamos el número de tuberías por paso:

$$N_{tubos+paso} = \frac{100}{2} = 50$$

Por lo tanto cada paso de tubos presenta 50 tubos por paso.

- DETERMINACIÓN DE LA CONFIGURACIÓN DE LOS BANCOS DE TUBOS.

Para nuestro caso se considera para el espaciamiento entre tubos un valor de  $1.5 \phi_{ext}$ , por lo tanto el espaciamiento entre tubos  $0.5 \phi_{ext}$ .

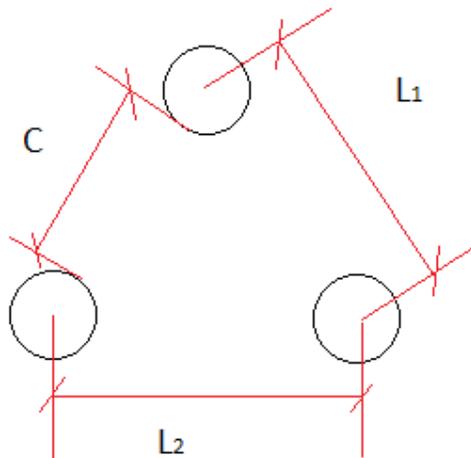


Figura N° 35 Disposición tubular

Fuente: Elaboración propia

$$L_1 = L_2 = 1.5 * 0.060325 = 0.0904875m = 90.875mm$$

$$C = 0.5 * \phi_{ext} = 0.5 * 0.060325 = 0.03016125m = 30.16125mm$$

- CARACTERIZACION DEL ESPEJO DEL CALDERO.

Tomando como referencia las características constructivas de los calderos Cleaver

Brooks para equipo de 200BHP, se considera  $\phi_{espejo} = 1524mm$

Para el cálculo del espesor del espejo se tiene en cuenta la siguiente ecuación según el Código ASME UG-34:

$$e = d * \sqrt{\frac{C * P}{S * E}}$$

Donde:

E = Eficiencia de la junta soldada (0.7)

P = Presión de diseño (6 kgf/cm<sup>2</sup>)

d = Diámetro interior del cilindro del caldero ( 1,524 mm)

S = Esfuerzo máximo del esfuerzo permitido del material.(1,100 kgf/ cm<sup>2</sup>)

e = Espesor mínimo requerido de la placa

C = Coeficiente establecido en la NORMA ASME UG-34 = 0.02

$$e = 1,5245 * \sqrt{\frac{0.02 * 6}{1,100 * 0.7}} = 19.03 \text{ mm}$$

Se opta por seleccionar un espesor comercial del espejo de 20 mm.

Para el cálculo del espesor del cuerpo del cilindro del caldero se tiene en cuenta la siguiente ecuación según el Código ASME UG-27:

$$e = \frac{P * R}{(S * E) + (0.4 * P)} + CA$$

Dónde:

E = Eficiencia de la junta soldada (0.7)

P = Presión de diseño (6 kgf/cm<sup>2</sup>)

R =Radio interior del cilindro del caldero (1,524 mm/2 =762 mm)

S = Esfuerzo máximo del esfuerzo permitido del material.(1,100 kgf/ cm<sup>2</sup>)

e = Espesor mínimo requerido de la placa

CA = Margen por corrosión

Los recipientes o partes de los mismos que estén sujetos a corrosión, erosión o Abrasión mecánica deben tener un margen de espesor para lograr la vida deseada , aumentando convenientemente el espesor del material respecto al determinado por las fórmulas de diseño , o utilizando algún método adecuado de protección .

La Norma UG-25b , estipula un margen de corrosión equivalente a 1/8" o 3.175 mm.

$$e = \frac{6 * 762}{(1,100 * 0.7) + (0.4 * 6)} + 3.175 = 9.09 \text{ mm}$$

Se opta por seleccionar un espesor comercial del espejo de 10 mm.

- DETERMINACION DEL HOGAR. El hogar o flue es un tubo cuyo diámetro debe estar entre el 40 y 45 % del espejo.

$$\phi_{CC} = 0.4 * \phi_{espejo} = 0.4 * 1524 = 609.6 \text{ mm}$$

Para el cálculo del espesor del hogar o flue del caldero se tiene en cuenta la siguiente ecuación según el Código ASME UG-28:

$$e = \frac{P * R}{(S * E) + (0.4 * P)} + CA$$

Dónde:

E = Eficiencia de la junta soldada (0.7)

P = Presión de diseño (6 kgf/cm<sup>2</sup>)

R = Radio del flue del caldero (609.6 mm/2 = 304.8 mm)

S = Esfuerzo máximo del esfuerzo permitido del material.(1,100 kgf/ cm<sup>2</sup>)

e = Espesor mínimo requerido de la placa

CA = Margen por corrosión, igual a 1/8" o 3.175 mm

$$e = \frac{6 * 304.8}{(1,100 * 0.7) + (0.4 * 6)} + 3.175 = 5.54 \text{ mm}$$

Se opta por seleccionar un espesor comercial más próximo para el espejo de 10 mm.

- DETERMINACIÓN DE LA CÁMARA DE VAPOR:

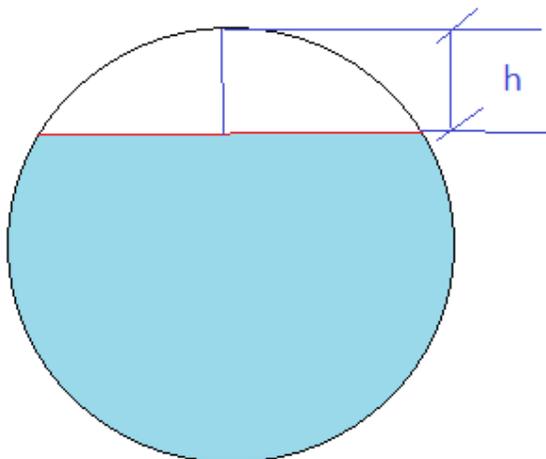


Figura N°36 Dimensiones de la cámara de vapor

Fuente: Elaboración propia

$$h = 0.2 * \phi_{\text{espejo}} = 0.2 * 1524 = 304.8\text{mm}$$

#### 4.1.3 ARREGLO DE TUBERIAS (Ver Anexo)

#### 4.1.4 DIMENSIONAMIENTO DEL CALDERO CON VARIACION DE PARAMETROS DE DISEÑO:

Se presentan los resultados para la determinación de las características del Caldero de 200 BHP, en función a diversas presiones de diseño.

Cuadro N° 01 Dimensionamiento Térmico de Caldero

Presion diseño(Bar)	5	6	7	8
BHP operación	134.39	134.84	135.21	135.52
BHP corregido	161.27	161.81	162.25	162.63
BHP diseño	200	200	200	200
m <sub>v</sub> (v nominal) kg/h	2976.5	2966.5	2958.4	2951.6
Factor de seguridad	48.8%	48.3%	47.9%	47.6%
m <sub>c</sub> (c nominal) kg/h	196.16	196.16	196.16	196.16
m <sub>c</sub> (c nominal) kg/sg	0.05449	0.05449	0.05449	0.05449
[[Potencia]]_quemador KW	2305.0	2305.0	2305.0	2305.0

Fuente: Elaboración propia

Se presentan los resultados para la determinación de las características del Caldero de 200 BHP, en función a diversas presiones de diseño.

Cuadro N° 02 Dimensionamiento de Componentes sometidos a presión del Caldero

Presion diseño(Bar)	5	6	7	8
Numero de Cedula	40	40	40	80
Diametro tuberia(pulg)	2	2	2	2
Diametro interior(mm)	52.5018	52.5018	52.5018	50.161
Diametro exterior(mm)	60.325	60.325	60.325	60.325
Peso (kg/m)	5.44	5.44	5.44	7.48
N° pasos	2	2	2	2
Longitud de tubos(m)	4.95	4.95	4.95	4.95
N° de Tubos por paso	50	50	50	50
Diametro espejo(mm)	1524	1524	1524	1524
Espesor del espejo(mm)	17.36759	19.02524	20.54961	21.96846
Valor comercial(mm)	20	20	25	25
Espesor cuerpo del caldero(mm)	8.1102	9.0942	10.0772	11.0591
Valor comercial(mm)	10	10	12.7	12.7
Diametro del flue (mm)	609.6	609.6	609.6	609.6
Espesor del material del flue(mm)	5.1491	5.5427	5.9359	6.3286
Valor comercial(mm)	10	10	10	10
Altura camara de agua (mm)	304.8	304.8	304.8	304.8

Fuente: Elaboración propia

## 4.2 DISEÑO MECANICO.

### 4.2.1 ESFUERZO EJERCIDO SOBRE LOS TUBOS Y CILINDRO

- a. ESFUERZOS DE COMPRESION SOBRE LOS TUBOS: Para la determinación de los esfuerzos de compresión debido a la tensión de origen radial que soportan las tuberías , tenemos el siguiente calculo, en función de la siguiente ecuación:

$$\sigma_{radial} = - \frac{Presion\ de\ diseño * \frac{D_e}{2}}{espesor\ de\ tuberia}$$

Dónde:

De = 60.325 mm

Espesor de la tubería: 3.9116 mm

Presión de diseño = 6 kgf/cm<sup>2</sup>

Asi mismo el esfuerzo máximo del material del tubo Sch 40 Grado A es 176 kgf/cm<sup>2</sup>

Para la verificación del esfuerzo máximo se tiene el siguiente calculo:

$$\sigma_{radial} = - \frac{6 * \frac{60.325}{2}}{3.9116} = 46.26 \text{ kgf/cm}^2$$

Se tiene un coeficiente de seguridad de diseño de:

$$\text{Coeficiente de seguridad} = \frac{176}{42.26} = 3.8$$

El valor es el esfuerzo de compresión obtenido es aceptable.

Para el caso de la prueba hidrostática , se verifica el valor máximo del esfuerzo del tipo radial sobre los tubos:

$$\sigma_{radial} = - \frac{12 * \frac{60.325}{2}}{3.9116} = 92.52 \text{ kgf/cm}^2$$

Se tiene un coeficiente de seguridad de diseño de:

$$\text{Coeficiente de seguridad} = \frac{176}{92.52} = 1.9$$

b. ESFUERZOS SOBRE LAS PAREDES INTERNAS DEL CILINDRO DEL CALDERO.

El cuerpo de presión de la caldera será totalmente soldado por fusión eléctrica de penetración completa. La lámina del vaso o cilindro de presión generalmente es de plancha de acero al carbono en Calidad Certificada ASTM A 285 grado C o ASTM A 515 Grado 70, seleccionándose de un espesor de 10 mm. , además el diámetro del cilindro es 1524 mm

Para realizar los cálculos de las deformaciones, se debe conocer previamente la denominación del cilindro sometido a presión. Si es de pared gruesa o de pared delgada.

Según la siguiente ecuación:

$$\frac{d_i}{e} \geq 40 \text{ Cilindro de pared delgada}$$

$$\frac{d_i}{e} \leq 40 \text{ Cilindro de pared gruesa}$$

Se verifica la denominación del cilindro sometido a presión:

$$\frac{1524}{10} = 152.4 \text{ entonces es un Cilindro de pared delgada}$$

Los cilindros de pared delgada se encuentran sometidos a esfuerzos circunferenciales y axiales, el esfuerzo del tipo radial es pequeño debido a la siguiente condición:

$$\text{Si } \frac{e}{d_i} > 1 \text{ entonces el esfuerzo radial es minimo.}$$

Los esfuerzos presentes son los siguientes:

Esfuerzos circunferenciales: Se tiene la siguiente representación:

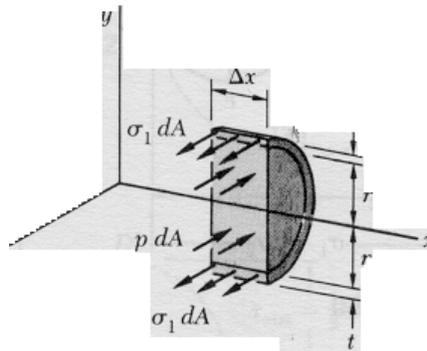


Figura N°37 Esfuerzos circunferenciales por recipientes de pared delgada sometidos a presión

Fuente: Mecánica de Materiales (Ferdinand)

Se tiene la siguiente ecuación:

$$\sigma_{\text{circunferencia}} = \frac{\text{Presion de operacion} * \text{Diametro interior del caldero}}{2 * \text{espesor del material del caldero}}$$

$$\sigma_{\text{circunferencia}} = \frac{6 * 1542}{2 * 10} = 462.6 \text{ kgf/cm}^2$$

El esfuerzo máximo que admite el acero Calidad Certificada ASTM A 285 grado C es de 1,100 kgf/cm<sup>2</sup>

Se tiene un coeficiente de seguridad de diseño de:

$$\text{Coeficiente de seguridad} = \frac{1,100}{462.6} = 2.38$$

El valor es el esfuerzo circunferencial obtenido es aceptable.

Esfuerzos axiales: Cuando el recipiente se ha cerrado termina actúa la presión interna sobre ellos para desarrollar una fuerza a lo largo del eje del cilindro. Esto se conoce como la tensión axial y es usualmente menor que la tensión circunferencial.

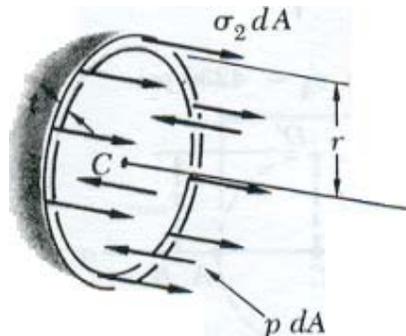


Figura N° 38 Esfuerzos axiales en recipientes de pared delgada sometidos a presión

Fuente: Mecánica de Materiales (Ferdinand)

Se tiene la siguiente ecuación modificada del esfuerzo circunferencial, en el cual el esfuerzo axial es la mitad del primero.

$$\sigma_{axial} = \frac{\text{Presion de operacion} * \text{radio interior del caldero}}{2 * \text{espesor del material del caldero}}$$

$$\sigma_{circunferencia} = \frac{6 * 771}{2 * 10} = 231.3 \text{ kgf/cm}^2$$

El esfuerzo máximo que admite el acero Calidad Certificada ASTM A 285 grado C es de 1,100 kgf/cm<sup>2</sup>

Se tiene un coeficiente de seguridad de diseño de:

$$\text{Coeficiente de seguridad} = \frac{1,100}{231.3} = 4.76$$

El valor es el esfuerzo circunferencial obtenido es aceptable.

- c. ESFUERZOS DE COMPRESION SOBRE LAS PAREDES EXTERNAS DEL FLUE DEL CALDERO.

En este caso el flue del caldero, está sometido a esfuerzos radiales de compresión por parte del agua presurizada, mientras que por la parte interna a este fluyen los gases de la combustión a baja presión.

Se ha seleccionado un plancha de acero del tipo MORRISON de diámetro 609.6 mm y de 10 mm.

Se tiene el siguiente cálculo del esfuerzo radial:

$$\sigma_{radial} = - \frac{\text{Presion de diseño} * \frac{D_e}{2}}{\text{espesor de tuberia}}$$

Para la verificación del esfuerzo máximo se tiene el siguiente calculo:

$$\sigma_{radial} = - \frac{6 * \frac{609.6}{2}}{10} = 182.88 \text{ kgf/cm}^2$$

Se tiene un coeficiente de seguridad de diseño, si el esfuerzo máximo del material es de 1,100 kgf/cm<sup>2</sup>

$$\text{Coeficiente de seguridad} = \frac{1,100}{182.88} = 6.01$$

#### 4.2.2 CAIDA DE PRESION

- a. CAIDA DE PRESION EN EL HOGAR O FLUE:

La caída de presión es calculada mediante la ecuación n° 19:

$$\Delta P_{hogar} = f * \frac{\rho * l_{hogar} * v^2}{2 * D_{i-hogar}}$$

Dónde:

$l_{hogar}$ : Longitud del hogar , es de 4.95 m

f: Factor de fricción, 0.017

v: Velocidad de los gases de combustión es de 10 m/sg , recomendada según el texto de Hornos Industriales de Trinks.

$$D_{i-hogar} = 0.6096 \text{ m}$$

$\rho$  , la densidad de los gases de la combustión es de  $1.3 \text{ kg/m}^3$

$$\Delta P_{hogar} = 0.017 * \frac{1.3 * 4.95 * 10^2}{2 * 0.6096} = 3.53 \text{ Pa}$$

b. CAIDA DE PRESION EN EL HAZ DE TUBOS:

Se tiene un flujo másico de gases de la combustión igual a :

$$\dot{m}_g = 1.0934 \text{ kg/sg}$$

Además un total de 50 tubo por cada paso , por lo tanto el flujo unitario de gases es de  $0.02186 \text{ kg/sg}$ .

El cálculo de la caída de presión es similar al cálculo de la caída de presión en el flue.

$$\Delta P_{haz \text{ de tubos}} = 2 * f * \frac{\rho * l_{paso} * v^2}{2 * D_i}$$

Dónde:

$l_{hogar}$ : Longitud de los tubos es de  $4.95 \text{ m}$  (el factor 2 se considera porque cada porción de flujo realiza 2 pasos antes de entrar en la chimenea)

f: Factor de fricción,  $0.017$

v: Velocidad de los gases de combustión es de  $10 \text{ m/sg}$  , recomendada según el texto de Hornos Industriales de Trinks.

$D_i$  diámetro interno es  $52.5018 \text{ mm}$

$\rho$  , la densidad de los gases de la combustión es de  $1.3 \text{ kg/m}^3$

$$\Delta P_{pasos} = 2 * 0.017 * \frac{1.3 * 4.95 * 10^2}{2 * 0.0525018} = 160 \text{ Pa}$$

c. CAIDA DE PRESION POR EXPANSIONES Y CONTRACCIONES.-Estas son compensadas debido a que los gases de la combustión se expanden y contraen cada vez que ingresan a un paso.

d. CAIDA DE PRESION TOTAL DE LOS GASES DE LA COMBUSTION .-Una caída de presión máxima permitida se considera un valor de  $20 \text{ psi}$ , por lo tanto la caída de presión por los gases de la combustión es de :

$$\Delta P = 3.53 + 60 = 63.53 \text{ Pa} = 0.01 \text{ Psi}$$

El valor de caída de presión es aceptable.

#### 4.2.3 RESULTADOS DE DISEÑO Y ESFUERZOS MECANICOS EN FUNCION A PRESIONES DE DISEÑO.

Se presentan los resultados para la determinación de las características del Caldero de 200 BHP, en función a diversas presiones de diseño.

Cuadro N°03 Variación de esfuerzos mecánicos en función de la presión de diseño

Presion diseño(Bar)	5	6	7	8
TUBERIAS				
Esfuerzos radiales sobre los tubos(kgf/cm2)	38.56	46.27	53.98	47.48
Coefficiente de seguridad	4.6	3.8	3.3	3.7
CILINDRO DEL CALDERO				
Esfuerzo circunferencial(kgf/cm2)	385.5	462.6	424.9606	485.6693
Coefficiente de seguridad	2.85	2.38	2.59	2.26
Esfuerzo axial(kgf/cm2)	192.75	231.3	212.4803	242.8346
Coefficiente de seguridad	5.71	4.76	5.18	4.53
FLUE				
Esfuerzo radial sobre el flue	152.4	182.88	213.36	243.84
Coefficiente de seguridad	7.22	6.01	5.16	4.51
CAIDAS DE PRESION				
Caida de presion en el flue(Pa)	3.53	3.53	3.53	3.53
Caida de presion en haz de tubos(Pa)	160	160	160	218
Caida de presion total(Pa)	163.53	163.53	163.53	221.53
CONDICION	ADMISIBLE	ADMISIBLE	ADMISIBLE	ADMISIBLE

Fuente: Elaboración propia.

#### 4.3 ASPECTOS CONSTRUCTIVOS.

La caldera tiene que fabricarse para que satisfaga los estándares razonables de seguridad, resistencia y durabilidad necesarios. Para asegurar una operación continua y satisfactoria , todos los elementos de la unidad deben asegurarse contra desplazamiento, distorsión, flexiones y otros deterioros; y los soportes deben colocarse en tal forma , que mantengan una relación correcta entre los componentes esenciales , dentro de condiciones racionales de operación y manejo. Aquellos elementos que no estén fijos en forma permanente , deben diseñarse en tal forma , que no puedan ser incorrectamente montados o erróneamente colocados, cuando se

quitan y se vuelven a ensamblar, durante las maniobras de limpieza u otra clase de servicios.

Se explican pasos importantes de su proceso productivo:

#### **4.3.1 FORMACION DEL CILINDRO Y DEL HOGAR:**

Luego de realizar el diseño respectivo de los espesores para el casco y el hogar , así como sus dimensiones , se procede a la compra de las planchas necesarias para la formación de esto elementos , luego se comprueba la cuadratura de la plancha midiendo las diagonales de la misma.

Una vez trazadas las planchas se procede al corte de las mismas mediante el método de corte con Maquina de PLASMA " , luego de lo cual se revisan nuevamente las medidas para su certificación , esto nos garantizará un trabajo de rolado totalmente cilíndrico.

Después de cortadas las planchas se procedió al rolado para el conformado del casco y del hogar de la caldera de acuerdo a las siguientes medidas.

#### **4.3.2 TRAZADO Y PERFORACION DE ESPEJOS:**

Se procede al trazo de los espejos tanto en la medida del diámetro, medida del hogar , tensores y en la distribución de los agujeros realizada previamente y tomando en cuenta la resistencia de los puentes entre los mismos.

El trabajo de maquinado de los agujeros se lo realizó en un taladro radial y con una broca de 50 mm, para la perforación se unieron los dos espejos con puntos de soldadura provisionales, de modo de asegurar una correcta alineación de los orificios; Además se perforaron 4 agujeros de 1" que sirven como tensores para bloquear la fuerza ejercida en este punto del espejo.

#### **4.3.3 ARMADO DEL CUERPO DE LA CALDERA:**

Una vez que ya se tienen conformados el casco, el hogar y los espejos, los cuales formarán el cuerpo de la caldera, se procede a su ensamblaje concéntrico mediante el proceso de soldadura por arco.

Terminado el trabajo de armado del cuerpo de la caldera se procedió a la perforación de los agujeros para las diferentes tomas de servicio,[ASME UG-46] manhole y handhole, y a la colocación de los nipples para el armado de los accesorios.

#### **4.3.4 ARMADO DE LA BASE DE LA CALDERA:**

Como parte complementaria de este equipo se procedió al armado de la base de acuerdo a las medidas programadas , y cuya altura esta en función de permitir un fácil acceso para cualquier tipo de mantenimiento en la parte inferior de la misma , además evitar emposamientos ya sea de agua o de combustible, que pueden traer consecuencias posteriores para el equipo.

#### **4.3.5 MONTAJE DE LOS TUBOS DE FUEGO:**

Como siguiente paso se procedió a la colocación de los tubos de fuego ( 100 tubos, Diam. 2" ) , los cuales deben estar perfectamente alineados y rectos, de lo contrario se tendrá problemas al ensamblarlos.

Se debe cortar el tubo a una longitud de modo que sobresalga 1/4" a 3/8" en cada extremo, se asienta el tubo con un expansor lo preciso para tener junta hermética con una presión hidrostática igual a 2 veces la presión de diseño, o cuando menos la graduación de la válvula de seguridad.

Una valiosa guía es la medición del diámetro interior del tubo , conforme avanza la rectificación o ajuste del tubo, el metal de la pared cortada tiende a fluir y separarse del interior de la placa de tubos . Se forma un borde extruido. Por ningún motivo deje que el borde extruido o engrosamiento sobresalga mas de 1/32". El diámetro interior después de ajustar el diámetro interior que queda no debe ser mayor que el diámetro interno original del tubo mas la holgura del agujero y mas la mitad del espesor del tubo.

#### **4.3.6 DETALLES DE LAS UNIONES SOLDADAS:**

Las soldaduras de los diferentes elementos se han realizado en base a las indicaciones del texto de Recipientes a Presión de Megyesy E. Con este procedimiento se garantiza una muy buena unión de los elementos al utilizar uniones normalizadas, estos detalles de soldadura estan especificados en los planos anexos.

En general toda la escoria o fundente que quede sobre el cordón de soldadura ha de quitarse antes de poner la siguiente capa, cualquier porosidad que aparezca en la superficie del cordón deberá ser corregida e eliminada mediante esmerilado antes de colocar sobre este el próximo cordón de soldadura.

Se utilizará el proceso de soldadura de arco manual con electrodo revestido , ( SMAW ) para este caso utilizaremos como base ( raíz ) electrodos que garanticen una penetración profunda como el AWS E6010 ( D.C. ) de diámetro 1/8” , y un electrodo AWS E7018 ( D.C ) de diámetro 5/32” para relleno y acabado.

Para unir las partes que no están sometidas a presión se utilizará un electrodo que garantice una buena unión con el AWS E6011 ( A.C.) de diámetro 1/8”

Se presenta el Diagrama de GANTT del periodo de construcción de los componentes del caldero.

Cuadro N°4 Diagrama de GANTT del Proceso

N°	DETALLE	MES 1				MES 2				MES 3				MES 4				MES 5				TOTAL HORAS
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	
1	FORMACION DEL CLINDRO Y DEL HOGAR																					100
2	TRAZADO Y PERFORACION DE ESPEJOS																					96
3	ARMADO DEL CUERPO DE LA CALDERA																					50
4	ARMADO DE LA BASE DE LA CALDERA																					48
5	MONTAJE DE TUBOS DE FUEGO																					250
6	DETALLES DE UNIONES SOLDADAS																					120
7	COMPONENTES AUXILIARES																					200
8	MAMPOSTERIA Y ACABADOS																					180
9	INSPECCIONES Y CERTIFICACION																					20
TOTAL HORAS EFECTIVAS LABORADAS																				1064		

Fuente: Elaboración propia.

#### 4.4 COMPONENTES AUXILIARES.

##### 4.4.1 SISTEMA DE ALIMENTACION DE AGUA

###### a. DETERMINACIÓN DE LAS DIMENSIONES DEL TANQUE DIARIO DE AGUA:

Teniendo en cuenta que le flujo de vapor es de 2,966.5 kg/sg y es continua, el caudal es  $2.9665 \text{ m}^3/\text{h} = 8.24 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{sg}$ .

Se puede considerar como agua de reposición la tercera parte del caudal requerido por la caldera:

$$Q_{\text{reposicion}} = \frac{Q}{3} = \frac{2.9665}{3} = 0.988 \text{ m}^3/\text{h}$$

Asumiendo en este caso un volumen almacenado con una garantía de suministro de agua de 12 hora, además se debe considerar que el depósito de agua es cilíndrico y con las siguientes dimensiones:

$$Longitud = 3 * diametro$$

Por lo tanto el volumen garantizado de agua es igual a:

$$V_{tanque} = 12 * 0.988 = 11.856 m^3$$

Hallamos el diámetro del tanque:

$$11.856 = \frac{3 * \pi}{4} * diametro^3$$

$$diametro = 1.713 m$$

Por lo consiguiente la longitud del tanque es:

$$Longitud = 1.713 * 3 = 5.14 m$$

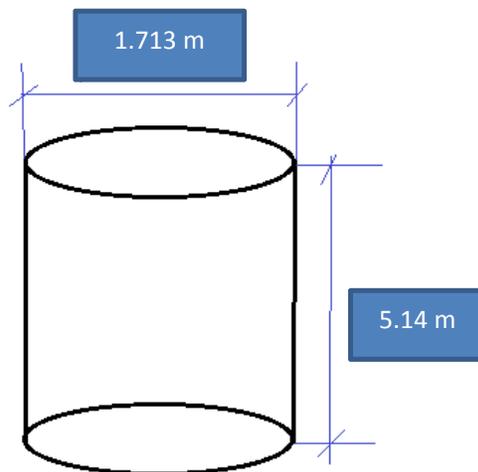


Figura N° 39 Dimensiones del tanque de agua de alimentación de agua

Fuente: Elaboración propia

- b.** DIMENSIONAMIENTO DE LA BOMBA: Se tiene el siguiente circuito de alimentación de agua. Además asumiendo un diámetro de descarga igual  $1 \frac{1}{4}$ " y un diámetro de succión igual a 2".

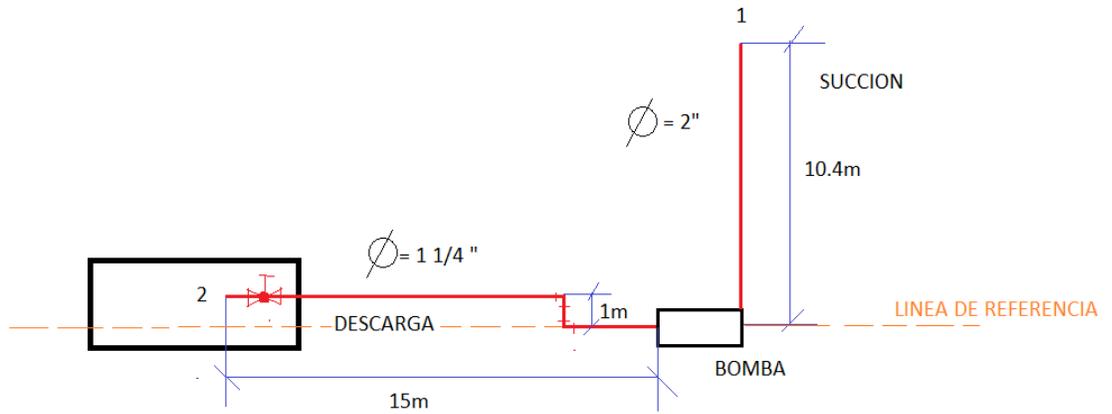


Figura N° 40 Circuito de alimentación de agua

Fuente: Elaboración propia

Hallamos la altura de bombeo, aplicando la ecuación de Bernoulli entre 2 puntos.

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 + H_B = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 + H_F$$

Como la velocidad  $V_1 = 0$ , a la entrada de la tubería de succión, tenemos:

$$H_B = \frac{P_2 - P_1}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + (Z_2 - Z_1) + H_F$$

c. CALCULO DE LAS PERDIDAS PRIMARIAS Y SECUNDARIAS DE LAS TUBERÍAS DE SUCCION:

Para el Diámetro nominal de 2" tenemos Diámetro interior de 52.5018 mm

Aplicando la ecuación de continuidad para poder hallar la velocidad del agua que pasa por las tuberías de succión:

$$Q = Area * velocidad$$

$$Q = \pi * \frac{Diametro\ interior^2}{4} * velocidad$$

$$8.24 * 10^{-4} \frac{m^3}{sg} = \pi * \frac{0.0525018^2}{4} * velocidad$$

La velocidad del fluido que pasa por las tuberías de succión es 0.38 m/seg

Se tienen en cuenta los siguientes criterios según el texto de diseño de hidráulica general de Gilberto Sotelo Ávila.

- Velocidad mínima de agua = 0.3 m/sg, un valor inferior a este puede ocasionar sedimentación del agua.
- Velocidad máxima del agua = 2.5 m/sg, un valor superior comienza a generar turbulencia y erosión dentro de las tuberías.

Teniendo en cuenta el texto de Mecánica de fluidos de MOTT se determinan los coeficientes de los accesorios:

- Entrada brusca:

$$\frac{L_{\text{entrada}}}{\text{Diametro interior}} = 27$$

$$L_{\text{entrada}} = 27 * 0.0525018 = 1.418 \text{ m}$$

Así mismo se determina la pérdida longitudinal:

Tubería:

$$L_{\text{tubería de 2" }} = 10.4 \text{ m}$$

Se tienen las pérdidas longitudinales totales del sistema:

$$\sum L = 10.4 + 1.418 = 11.818 \text{ m}$$

Luego la pérdida en la tubería de succión se calcula según la ecuación de Darcy Weisbach:

$$H_{ps} = f * \frac{L * v^2}{2 * D * g}$$

Aplicando un factor de fricción de 0.017.

$$H_{ps} = 0.017 * \frac{11.818 * 0.38^2}{2 * 0.0525018 * 9.81} = 0.028 \text{ m}$$

d. CALCULO DE LAS PERDIDAS PRIMARIAS Y SECUNDARIAS DE LAS TUBERÍAS DE DESCARGA:

Para el Diámetro nominal de 1 1/4" tenemos Diámetro interior de 35.052 mm

Aplicando la ecuación de continuidad para poder hallar la velocidad del agua que pasa por las tuberías de succión:

$$Q = \pi * \frac{\text{Diametro interior}^2}{4} * \text{velocidad}$$

$$8.24 * 10^{-4} \frac{\text{m}^3}{\text{sg}} = \pi * \frac{0.035052^2}{4} * \text{velocidad}$$

La velocidad del fluido que pasa por las tuberías de succión es 0.85 m/seg (es una velocidad que se encuentra dentro del rango sugerido ( 0.3 a 2.5 m/sg)

Teniendo en cuenta el texto de Mecánica de fluidos de MOTT se determinan los coeficientes de los accesorios:

- 2 de 90° :

$$\frac{L_{\text{codos}}}{\text{Diametro interior}} = 20$$

$$L_{\text{entrada}} = 2 * 20 * 0.035052 = 1.40208 \text{ m}$$

- Válvula de compuerta completamente abierta:

$$\frac{L_{\text{valvula}}}{\text{Diametro interior}} = 13$$

$$L_{\text{entrada}} = 13 * 0.035052 = 0.456 \text{ m}$$

- Así mismo se determina la perdida longitudinal por tramo de tubería de descarga.

$$\text{Tubería: } L_{\text{tubería}, \phi=1\frac{1}{4}} = 16 \text{ m}$$

$$\text{Salida: } k=1, \text{ tenemos: } \frac{L_{\text{salida}}}{\phi} = 47 \Rightarrow L_{\text{salida}} = 47 * 0.035052 = 1.647 \text{ m}$$

Se tienen las pérdidas longitudinales totales del sistema de descarga:

$$\sum L = 1.647 + 16 + 1.40208 + 0.456 = 19.50508 \text{ m}$$

Luego la pérdida en la tubería de descarga se calcula según la ecuación de Darcy Weisbach:

$$H_{pd} = f * \frac{L * v^2}{2 * D * g}$$

Aplicando un factor de fricción de 0.017.

$$H_{pd} = 0.017 * \frac{19.50508 * 0.85^2}{2 * 0.35052 * 9.81} = 0.0348 \text{ m}$$

e. DETERMINACION DE LA POTENCIA DE LA BOMBA DE AGUA:

Las pérdidas totales del sistema es igual a:

$$H_f = H_{ps} + H_{pd}$$

$$H_f = 0.028 + 0.034 = 0.0628 \text{ m}$$

Reemplazamos en la ecuación de Bernoulli:

$$H_B = \frac{(1200 - 100)kPa}{9.8 \text{ kN/m}^3} + \frac{0.85^2}{2 * 9.81} + (1 - 10.4) + 0.0628$$

$$H_B = 102.83 \text{ m}$$

Agregamos un 10% para compensar las pérdidas en las tuberías:

$$H_B = 102.83 \text{ m} * 1.1 = 113.11 \text{ m}$$

La Potencia mecánica de la bomba es igual a:

$$P_B = \frac{10^3 * 9.81 * 113.11 * 8.24 * 10^{-4}}{10^3} = 0.914 \text{ KW}$$

Asumiendo una eficiencia de 85% del motor eléctrico, determinamos la potencia del motor eléctrico:

$$P_B = \frac{0.914 \text{ KW}}{0.85} = 1.075 \text{ KW}$$

#### 4.4.2 CALCULO DE LA CHIMENEA DE TIRO NATURAL:

a. CRITERIOS:

Se tiene en cuenta los siguientes criterios:

- Velocidad de los gases de la combustión saliente por la chimenea de 10 m/sg , recomendada según el texto de Hornos Industriales de Trinks.
- Temperatura de gases de la combustión igual a 180 °C , valor recomendado para un adecuado aprovechamiento de gases de la combustión dentro de un caldero pirotubular cuando se combustiona con petróleo residual (Fuente : Conae Comisión Ahorro de Energía de México y Manual II de Diagnósticos y Racionalización de la Energía de la Universidad Nacional del Santa )
- Densidad de los gases de la combustión igual a 1.3 kg/m<sup>3</sup>
- Relación aire/combustible estequiométrico de 14.7 kg aire/kg de combustible para el Petróleo R500 , a lo cual se considera un exceso de aire entre 25 a 30 % para una buena combustión . Por lo tanto la Relación aire/combustible real es igual a :

$$R_{\frac{a}{c}}^{real} = 14.7 * 1.3 = 19.11 \frac{kg \text{ de aire}}{kg \text{ de combustible}}$$

b. DIMENSIONES DE LA CHIMENEA:

El flujo de gases de la combustión se determina aplicando la ecuación de continuidad en el caldero.

Flujo de combustible:

$$\dot{m}_{c \text{ nominal}} = 0.0544 \text{ kg/sg}$$

Flujo de aire:

$$\dot{m}_a = 0.0544 \frac{kg}{sg} * 19.11 = 1.039 \text{ kg/sg}$$

Flujo de gases de la combustión:

$$\dot{m}_g = 0.0544 + 1.039 = 1.0934 \text{ kg/sg}$$

$$A = \frac{m_g}{v * \rho_g} * \left( \frac{273 + Th}{273} \right) m^2$$

Se determina el área de paso según la siguiente ecuación:

$$A = \frac{m_g}{v * \rho_g} * \left( \frac{273 + T_g}{273} \right) m^2$$

$$A = \frac{1.0934}{10 * 1.3} * \left( \frac{273 + 180}{273} \right) = 0.139 m^2$$

El diámetro del paso de los gases de la combustión es:

$$A = \frac{\pi * D^2}{4}$$

$$0.139 = \frac{\pi * D^2}{4} \quad D = 0.42 m$$

c. ALTURA DE CHIMENEA:

Aplicando la ecuación para la determinación de la altura de chimenea por tiro natural.

$$A = \frac{k * N}{\sqrt{H}}$$

Dónde:

K=es un factor igual a 0.02 ( del Texto Hornos Industriales de Trinks)

H=altura de la caldera de la chimenea

N=potencia del caldero (Kcal/h)

$$N = 200BHP * 8,437 \frac{kcal}{BHP} = 1'687,400 kcal/h$$

$$0.139 * 10^{-4} = \frac{0.02 * 1'687,400}{\sqrt{H}}$$

$$H = 589.47 cm$$

#### **4.5 PRUEBAS Y ENSAYOS.**

Se presentan los resultados de las pruebas realizadas para poder verificar la confiabilidad de la construcción del caldero de 200 BHP

##### **4.5.1 PRUEBA HIDROSTATICA:**

Se aplicó la Norma ANSI B31.1 compatible con el Código ASME para recipientes sometidos a presión, tal como calderos.

###### **a. PROCEDIMIENTO PARA LA PREPARACIÓN DE LA PRUEBA HIDROSTÁTICA:**

Preparar una prueba hidrostática significa que se deben tomar todas las precauciones inherentes a todo el proceso. Esto es por el riesgo que presenta la operación. De acuerdo con lo expuesto se debe considerar lo siguiente:

Asegurarse de adecuar el sitio para dejar fácil acceso para realizar la inspección.

Hacer un análisis razonable de todos los pasos del procedimiento para hacer la prueba, a fin de asegurarse que el equipo o la tubería que esté bajo prueba no sufra un “impacto accidental”.

No está permitido por ningún motivo golpear la tubería o equipo, ni tratar de corregir fugas entre bridas con llaves, mientras el sistema este presurizado.

Asegurarse que todos los dispositivos de alivio de presión, tales como, placas de orificio, juntas de expansión, válvulas de retención y similares, accesorios de instrumentación, entre otros, están excluidos de la prueba por lo que deben ser sustituidos por piezas provisionales o aislados utilizando discos ciegos.

Disponer de adecuadas conexiones de alimentación y descarga del fluido de prueba, de tal manera que el sistema pueda ser llenado y drenado dentro de un tiempo razonable; así mismo, prever adecuado y efectivo aislamiento para tales conexiones, con ventosas en puntos altos para asegurar el completo desplazamiento del aire entrampado.

Disponer de una adecuada bomba para realizar la prueba, con dos (2) manómetros por lo menos calibrados y ubicados donde estos puedan ser vistos fácilmente por el personal responsable de monitorear la prueba.

Asegurarse que cualquier tratamiento térmico post-soldadura que haya sido requerido en el procedimiento de soldadura, se haya completado con suficiente antelación a la prueba.

Asegurarse que cualquier soldadura, la cual debe ser cubierta con aislamiento externo por razones de proceso o recubiertas con pinturas por razones de protección, se mantengan libres o al descubierto hasta que sea completada la prueba.

Asegurarse que la presión no se exceda del valor fijado durante la prueba.

b. ENSAYOS REALIZADOS (Ver formato en Anexos)

Se presenta la secuencia de la prueba hidrostática realizada al Caldero de 200 BHP , con las siguientes características:

Tiempo de proceso de arranque 20 minutos

Tiempo de llegada a la presión de diseño desde la presión de operación : 20 minutos

Tiempo de elevación de presión de prueba desde la presión de diseño: 20 minutos

Tiempo de prueba hidrostática: 60 minutos

Tiempo de reducción de presión o despresurización: 60 minutos

Durante el ensayo no se presentaron fugas o presencia de grietas en las uniones soldadas entre el espejo y el cuerpo del cilindro del caldero, ni en los uniones expandados y soldadas de los haces tubulares al espejo.

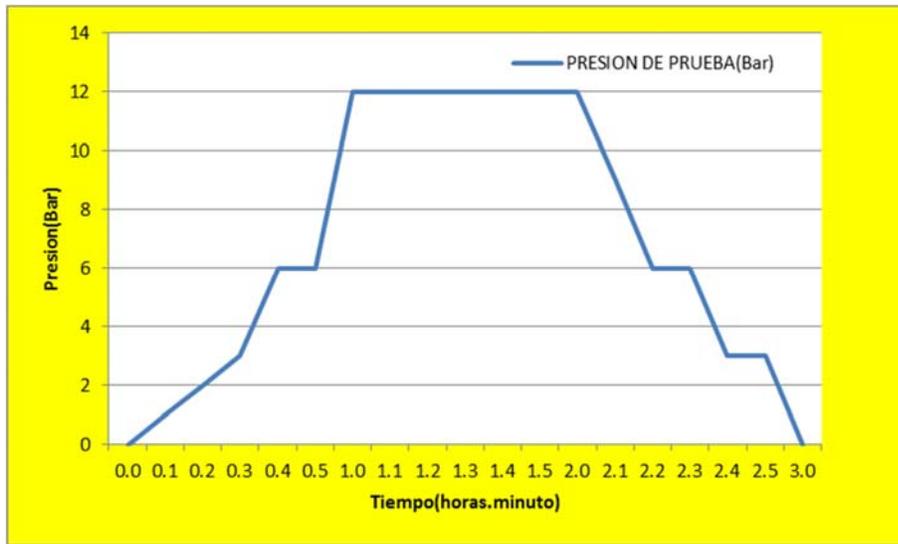
Se presenta el cuadro y gráfico de secuencia de presurizado , ensayo y despresurizado del Caldero de 200 BHP.

Cuadro N°5 Presión Hidrostática del Caldero de 200 BHP

PRESION DE OPERACIÓN		4	Bar
PRESION DE DISEÑO		6	Bar
PRESION HIDROSTATICA		12	Bar
PRESION DE PRUEBA(Bar)		TIEMPO DE PRUEBA(h.m)	
P1	0	T1	0.0
P2	1	T2	0.1
P3	2	T3	0.2
P4	3	T4	0.3
P5	6	T5	0.4
P6	6	T6	0.5
P7	12	T7	1.0
P8	12	T8	1.1
P9	12	T9	1.2
P10	12	T10	1.3
P11	12	T11	1.4
P12	12	T12	1.5
P13	12	T13	2.0
P14	9	T14	2.1
P15	6	T15	2.2
P16	6	T16	2.3
P17	3	T17	2.4
P18	3	T18	2.5
P19	0	T19	3.0

Fuente : FIC Ingenieros

Grafico N° 1 Secuencia de elevación de presión para prueba hidrostática



Fuente : FIC Ingenieros

#### 4.5.2 PRUEBA DE OPERACIÓN –ARRANQUE EN FRIO:

Se presenta la secuencia de arranque en frio del Caldero de 200 BHP, el cual se realiza por etapas de presión con la finalidad de poder adecuar al equipo a las condiciones de esfuerzo y térmico y mecánico al que se ve sometido. En este caso:

Presión máxima: 4 Bar

Temperatura en el cuerpo del caldero (zona presurizada): 143 °C(Temperatura de saturación a 4 Bar)

Temperatura en el flue –boca del quemador: 1200 °C

Temperatura final del flue – 800 °C

Temperatura ingreso de gases de la combustión al 1 paso: 700 °C

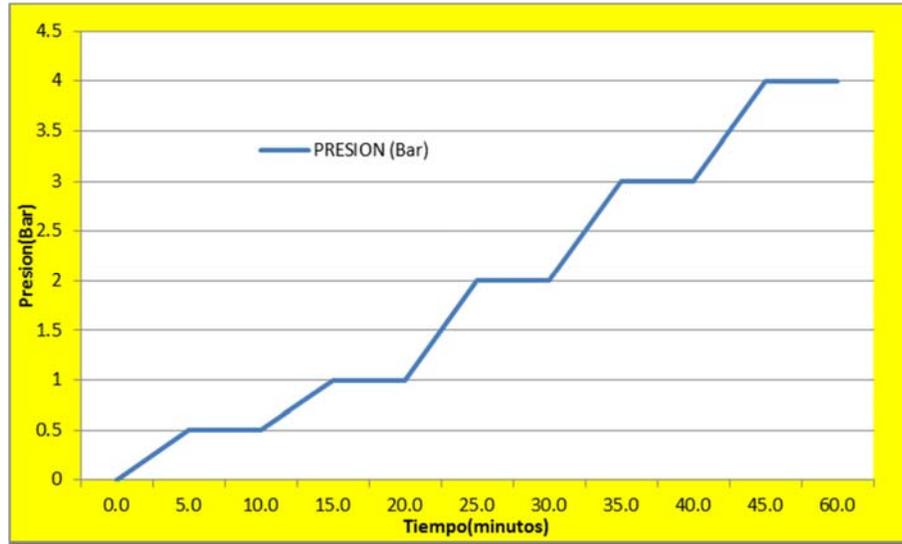
Temperatura salida de gases de la combustión del 1 paso: 450 °C

Temperatura ingreso de gases de la combustión al 2 paso: 400°C

Temperatura salida de gases de la combustión del 1 paso: 200 °C

Temperatura ingreso de gases de la combustión a la chimenea: 190°C

Grafico N° 2 Secuencia de elevación de presión para arranque en frio del caldero de 200 BHP



Fuente : FIC Ingenieros

#### 4.6 ANALISIS ECONOMICO.

Para la ejecución del proyecto la empresa FIC INGENIEROS S.A. asignó una cantidad de U\$ 316,000.00, esta inversión se justifica básicamente por la reducción en el tiempo de entrega , reducción de impuestos , y una reducción en el costo de la máquina , comparándola con una similar importada

##### INVERSION FIJA

La caldera fue construida en su totalidad en el taller de la Empresa , por lo tanto los gastos por equipos para maquinado y armado , mano de obra para el ensamblaje , y accesorios de control y seguridad se indican detalladamente a continuación:

Cuadro N°6 Costo cuerpo de la caldera

N°	DESCRIPCION	COSTO(U\$)
1	Casco	25,000.00
2	Hogar	20,000.00
3	Espejos	12,000.00
4	Tubos de fuego	60,000.00
5	Base	12,000.00
6	Concreto refractario	5,000.00
7	Tapas	10,000.00
	SUBTOTAL 1	144,000.00

Fuente :Elaboracion propia

Cuadro N°7 Equipos y accesorios complementarios

N°	DESCRIPCION	COSTO(U\$)
1	Quemador ECOFLAM	45,000.00
2	Compresor (MARATHON)	5,000.00
3	Bomba de Agua (AURORA PUMP)	6,800.00
4	Bomda Petroleo (VIKING)	5,500.00
5	Micprocesador(HONEYWELL)	7,800.00
6	Tablero de control	5,200.00
7	Manómetros	1,500.00
8	Presostatos	3,500.00
9	Valvulas de seguridad	15,000.00
10	Valvula de nivel (MCDONELL)	4,500.00
11	Manhole	4,500.00
12	Handhole	6,000.00
13	Aislamiento(lana de vidrio)	2,500.00
14	Forro galvanizado	1,500.00
15	Pernos para tapas	1,000.00
16	Accesorios para instalacion.	1,800.00
17	Servicios de Mano de obra	15,800.00
18	Supervision	24,000.00
19	Gastos generales )10 %)	15,600.00
	SUBTOTAL 2	172,500.00

Fuente :Elaboracion propia

#### **4.7 DISCUSION DE RESULTADOS**

##### **4.7.1 CON REFERENCIA A LOS COMPONENTES DEL CALDERO:**

- Se ha determinado las características de diseño del Caldero requerido , para lo cual se ha tomado en cuenta el flujo másico de vapor saturado, el cual es de 2,000 kg/h a una presión de 2 kgf/cm<sup>2</sup>. Para la determinación de la presión de operación se aplicó un factor de seguridad del 100 % con el cual se obtiene una presión de operación de 4 kgf/cm<sup>2</sup>. Así mismo se ha determinado la presión de diseño aplicando un factor del 50% sobre la presión de operación, con el cual la presión de diseño es de 6 kgf/cm<sup>2</sup>.
- En función a los valores de presión con los criterios anteriormente descritos, se consigue una Potencia de diseño de 134.84 BHP , con lo cual se consigue un valor corregido de 161.81 BHP aplicando un factor de seguridad de 1.2, este valor de la potencia se reajusta a un valor comercial existe para Potencia en BHP , el cual es de 200 BHP , el cual es el valor elegido para la potencia de diseño del caldero.
- Sus valores de diseño son de 200 BHP , un flujo másico de vapor nominal de 2,966.5 kg/h /con un margen de seguridad del 48.3 % , y un flujo másico de combustible de 196.16 kg/h de Petróleo Residual 500 (54.23 Gal/h) para un quemador del tipo ECOFLAM 300.1.
- DE manera similar se ha realizado el mismo cálculo para diversos valores de presión de diseño , con los valores de 5,6, 7 y 8 kgf/cm<sup>2</sup> , obteniéndose un valor comercial de 200 BHP , con lo cual podemos decir que un requerimiento de vapor de 2,000 kg/h a una presión de servicio de 2 kgf/cm<sup>2</sup>, el valor de la Potencia de diseño no se altera, ni los valores del flujo nominal de combustible y vapor , así como las características del quemador(tal como se detalla en el Cuadro N° 01)
- Se han determinado los componentes del caldero sometidos a presión tal como lo son: el cilindro o cuerpo del caldero , diámetro del espejo, diámetro del flue , diámetro de tuberías y altura de la cámara de agua en función a las presiones de diseño de 5,6, 7 y 8 kgf/cm<sup>2</sup>.
- Con respecto al Número de Cedula se ha seleccionado para el caso de una presión de diseño de 6 kgf/cm<sup>2</sup> un valor comercial de tubería de acero al carbono sin costura de

2" Sch 40 , en los otros casos el valor de la tubería es la misma , salvo para el caso del incremento de presión de diseño hasta 8 kgf/cm<sup>2</sup> ,en el cual el número de cedula se incrementa a un valor comercial en el mercado de Sch 80.(el cual es una tubería de mayor espesor y mayor costo)

- El Numero de pasos seleccionado es de 2 con una longitud de 4.95 m por paso ,con 50 tubos para cada paso, en todos los casos de presión de diseño analizado.
- Con referencia al diámetro del espejo, este tiene un valor de 1,524 mm , el cual es un valor comercial para Calderos de 200 BHP (tomado de las dimensiones comerciales de Calderas CB y Distral). Para los casos de presión de diseño de 5 y 6 kgf/cm<sup>2</sup> el espesor del espejo es de 20 mm, incrementándose a un valor de 25 mm para los casos en las que la Presión de diseño es de 7 y 8 kgf/cm<sup>2</sup>. A esto podemos indicar que para presiones de 7 y 8 kgf/cm<sup>2</sup>, los valores de los materiales crecen, con lo que los costos de fabricación se incrementan.
- De la misma manera el espesor de la plancha de acero es mayor para los casos de presiones de 7 y 8 kgf/cm<sup>2</sup> con un valor comercial de 12.7 mm (1/2") , mientras que para los casos en el que la presión de diseño es de 5 y 6 kgf/cm<sup>2</sup> el valor del espesor de la plancha de acero del cuerpo del cilindro es de 10 mm.
- Con referencia al diámetro del flue, se ha optado por un valor de 609.6 mm para todas las presiones de diseño ( 40% del valor del diámetro del espejo), con un valor comercial de la plancha corrugada del tipo morrison de 10 mm.

#### **4.7.2 CON REFERENCIA A LOS ESFUERZOS MECANICOS:**

- Las tuberías conformantes del caldero se ven sometidas a esfuerzos radiales de compresión, para lo cual se ha determinado este valor para las distintas presiones de diseño en estudio. Para un presión de diseño de 6 kgf/cm<sup>2</sup> , se consigue un valor de 46.27 kgf/cm<sup>2</sup> , con un coeficiente de seguridad de 3.8, mientras que para el caso en que se tiene una presión de diseño de 8 kgf/cm<sup>2</sup> ,el esfuerzo es de 47.48 kgf/cm<sup>2</sup> ,con un coeficiente de seguridad de 3.7 ,siendo para todos los casos valores admisibles.

- En el caso del cilindro del caldero, debido a que esta es una plancha rolada y soldada en su conformación circunferencial y a los costados con el espejo , se presentan esfuerzos del tipo circunferencial y axial con valores de 462.6 y 231.1 kgf/cm<sup>2</sup> respectivamente , con coeficientes de seguridad de 2.38 y 4.76 respectivamente. Para los otros valores de la presión de diseño los valores de los esfuerzos y los coeficientes de seguridad están entre los valores admisibles, teniéndose siempre en cuenta que a mayor presión de diseño ,los esfuerzos se incrementan así como los coeficientes de seguridad disminuyen.
- Para el caso del flue para una presión de 6 kgf/cm<sup>2</sup> el esfuerzo radial de compresión es de 182.88 kgf/cm<sup>2</sup> , con un coeficiente de seguridad de 6.01.
- Se tiene además una caída de presión de 163.53 Pa , por parte de los gases de la combustión dentro del flue y los haces tubulares para una presión de diseño de 6 kgf/cm<sup>2</sup> , incrementándose el valor de la caída de presión hasta 221.53 Pa para una presión de 8 kgf/cm<sup>2</sup>. Con el cual se concluye que a mayor presión de diseño , la caída de presión de los gases de la combustión se incrementan.

#### **4.7.3 CON REFERENCIA A LOS COMPONENTES AUXILIARES:**

- Los cálculos se han determinado para un valor de presión de diseño de 6 kgf/cm<sup>2</sup>, obteniéndose para el sistema de alimentación de agua , un tanque de alimentación diaria de agua de 11.856 m<sup>3</sup> , con una longitud de 5.14 m y un diámetro de 1.713 m. Mientras que la Potencia eléctrica de la bomba de agua es de 1.075 KW.
- Para la chimenea se ha determinado, una estructura de 5.89 m y una sección de 0.42 m , valores con los cuales se consigue un tiro natural optimo para los gases de la combustión.

#### **4.7.4 CON REFERENCIA AL ANALISIS ECONOMICO:**

- Se tiene un costo de fabricación de 316,000.00 U\$ para el caso de un caldero de 200 BHP de presión de diseño de 6 kgf/cm<sup>2</sup> , con costo de 144,000.00 U\$ con respecto al costo del cuerpo de la caldera ( representa un 45.56 % del costo total) , mientras que por equipos y accesorios complementarios el costo es de 172,500 U\$ ( representa un 54.44 % del costo total).

**CONCLUSIONES**  
**Y**  
**RESULTADOS**

## CONCLUSIONES

1. Se determinó que existe una influencia de la presión de operación en la selección de la presión de diseño y en la selección de los componentes sometidos a presión del caldero , así como de los esfuerzos mecánicos , incrementándose los valores comerciales de los materiales del flue , cuerpo del caldero y del espejo a medida de que se incrementa la presión de diseño . Así mismo los esfuerzos mecánicos se incrementan a medida de que se incrementa la presión de diseño.
2. Se ha determinado la presión de diseño óptimo para el requerimiento de 2 Ton/hora de vapor saturado. , el cual es de 6 kgf/cm<sup>2</sup> , con una Potencia de 200 BHP , un flujo nominal de vapor de 2.99 Ton/h de vapor saturado , un consumo nominal de combustible de 54.23 Gal/h , con una eficiencia de diseño del caldero de 85 %.
3. Se han determinado las principales características de los componentes sometidos a presión, teniendo en cuenta las consideraciones del Código ASME para recipientes sometidos a presión, con un valor de diámetro del espejo de 1,524.5 mm, un diámetro del hogar de 609.6 mm, en ambos casos se utilizan planchas de 10 mm de Acero ASTM A 285 grado C y plancha tipo Morrison en lámina de acero al carbono en calidad ASTM A 285 grado C.
4. El caldero es de 2 pasos con 50 tuberías de 2" Sch 40 por paso con una longitud de 4.95 m , con un arreglo en tresbolillo dentro de la cámara de agua presurizada.
5. Se han determinado los esfuerzos mecánicos de los componentes del caldero, con los siguientes valores: Para los haces tubulares, el esfuerzo es de tipo radial por compresión con un valor de 46.27 kgf/cm<sup>2</sup> y con un coeficiente de seguridad de 3.8. Para el cuerpo del caldero se presentan esfuerzos del tipo circunferencial y axial con valores de 462.6 y 231.1 kgf/cm<sup>2</sup> respectivamente, con coeficientes de seguridad de 2.38 y 4.76 respectivamente. Finalmente para el hogar o flue el esfuerzo radial es de compresión es de 182.88 kgf/cm<sup>2</sup> , con un coeficiente de seguridad de 6.01.

6. Los cálculos se han determinado para un valor de presión de diseño de  $6 \text{ kgf/cm}^2$ , obteniéndose para el sistema de alimentación de agua, un tanque de alimentación diaria de agua de  $11.856 \text{ m}^3$ , con una longitud de  $5.14 \text{ m}$  y un diámetro de  $1.713 \text{ m}$ . Mientras que la Potencia eléctrica de la bomba de agua es de  $1.075 \text{ KW}$ . Para la chimenea se ha determinado, una estructura de  $5.89 \text{ m}$  y una sección de  $0.42 \text{ m}$ , valores con los cuales se consigue un tiro natural óptimo para los gases de la combustión.
7. Se han realizado las pruebas de ensayo hidrostático con un valor de  $12 \text{ kgf/cm}^2$  durante  $1$  hora de operación y la prueba de arranque en frío.
8. Se tiene un costo de fabricación de  $316,000.00 \text{ U\$}$  para el caso de un caldero de  $200 \text{ BHP}$  de presión de diseño de  $6 \text{ kgf/cm}^2$ , con costo de  $144,000.00 \text{ U\$}$  con respecto al costo del cuerpo de la caldera ( representa un  $45.56 \%$  del costo total), mientras que por equipos y accesorios complementarios el costo es de  $172,500 \text{ U\$}$  ( representa un  $54.44 \%$  del costo total).

## RECOMENDACIONES:

Se debe optar por instalar equipos adicionales al caldero en este caso referente al sistema de automatización, conformante al control de la presión y el nivel de agua, para lo cual sería adecuado realizar un estudio para la automatización del caldero.

Las planchas que formaran el casco y el hogar de la caldera deberán ser cortadas Perfectamente a escuadra para evitar problemas y complicaciones en el momento del rolado de las mismas.

La perforación de los espejos se debe hacer con la herramienta ( broca ) de la medida exacta para que la colocación y lo mas importante que es el ajuste de los tubos se lo realice de acuerdo a los parámetros establecidos.

La unión electro soldada de las partes sometidas a presión la debe realizar solamente personal preparado y calificado para este tipo de trabajo.

Si bien es cierto que el acero inoxidable es un material que no es afectado por la corrosión que produce el amoniaco, se puede optar por utilizar otras materiales comerciales cuyos tubos puedan encontrarse en el mercado , tal es el caso del aluminio. Con el cual se podría determinar o construir el interenfriador.

El uso del Software seria adecuado para optimizar los componentes y determinación de esfuerzos mecánicos, los esfuerzos térmicos no se han considerado debido a las características del flue , en el cual el material y su conformación absorben los problemas de dilatación que se presentan.

**REFERENCIAS  
BIBLIOGRAFICAS**

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

### TEXTOS

- BEER, Ferdinand. Editorial Mc Graw Hill .4° Edicion. 2007. 788 p.  
ISBN 9701061012
- BUECKER, Brad. “ Basic of boiler and HRSG design”. 1° Edición. 2002.170 p.  
ISBN 0878147950
- CENGEL, Yunus . “Termodinámica”. Editorial Mc Graw Interamericana. 4° Edicion.  
España 2012. 1000 p.  
ISBN 607150743X
- GAFFERT,G.A. “ Centrales de Vapor”. Editorial Reverte.7° Edición. 1981. 595 p.  
ISBN 84-291-4830-2
- HESELTON, Kenneth . “Boiler Operator Handbook”. 1° Edicion.2005. 405 p.  
ISBN 9780881734355
- MOTT,R. “Mecánica de Fluidos”. 7 Edicion. Editotorial Pearsons Educacion. 2006. 626  
p.  
ISBN 9702608058
- TRINKS, W. “Hornos”. Ediciones URMO.1982 . España. 376 p.  
ISBN 8431401710
- VARETTO, Raúl. “Conducción de generadores de Vapor “.1° Edición. 2012. 210 p.  
ISBN 9505532237

## CITAS WEB

- ASME, “Código y Normas ASME en Castellano para recipientes sometidos a presión”. [Consulta: 04 de noviembre 2013]. Disponible en:  
<http://files.asme.org/Catalog/Codes/PrintBook/34364.pdf>
- CASTILLO Neira, Percy. “Manual de Combustión del Gas Natural”. Perú. 2011. [Consulta: 27 de setiembre 2013]. Disponible en:  
[http://www.combustionindustrial.com/MANUAL\\_PRACTICO\\_DE\\_COMBUSTION INDUSTRIAL.pdf](http://www.combustionindustrial.com/MANUAL_PRACTICO_DE_COMBUSTION INDUSTRIAL.pdf)
- CLEAVER BROOKS, “Manual de Calderas Pirotubulares”. México, 2011. [Consulta: 22 de noviembre 2013]. Disponible en:  
[https://www.google.com.pe/search?q=boiler&hl=en&source=Inms&sa=X&ei=4EGoUq2RGcvrkAekoYCoBQ&ved=0CAgQ\\_AUoAA#hl=en&q=calderas+cleaver+brooks+manual](https://www.google.com.pe/search?q=boiler&hl=en&source=Inms&sa=X&ei=4EGoUq2RGcvrkAekoYCoBQ&ved=0CAgQ_AUoAA#hl=en&q=calderas+cleaver+brooks+manual)
- **SISMAN**, “Libro de Calderos” . México. 2010. [Consulta: 27 de noviembre 2013]. Disponible en:  
<http://www.sisman.utm.edu.ec/libros/FACULTAD%20DE%20CIENCIAS%20MATEM%C3%81TICAS%20F%C3%81SICAS%20Y%20QU%C3%81MICAS/INGENIER%C3%81DA%20MEC%C3%81NICA/09/Calderas/Libros/libro%20Calderas.pdf>

## TESIS

- MENA CACERES, Fabrizio. “Diseño termo-hidráulico de una caldera para recuperar la energía de los gases de combustión”. Tesis para optar el Grado de Ingeniero Mecánico. Universidad Politécnica del Litoral. Ecuador. 2010. 201 p.
- QUIÑONEZ CERCADO, Nick. “Desarrollo de software para el análisis y diseño térmico de calderas pirotubulares horizontales”. Tesis para optar el título de Ingeniero Mecánico. Universidad Politécnica del Litoral. Ecuador. 2008. 146 p.
- RODRIGUEZ VASQUEZ, Renato. “Desarrollo de un sistema de control avanzado de la presión de vapor de una caldera de tubos de fuego”. Tesis para optar el grado de Magíster en Ingeniería de Control y Automatización. Pontificia Universidad Católica del Perú. 2006. 188 p.

# **ANEXOS**

ANEXO N° 01: Tablas de propiedades termodinámicas del Vapor de Agua

Presión bar	Temp. °C	Volumen específico m <sup>3</sup> / kg		Energía interna kJ / kg		Entalpía kJ / kg			Entropía kJ / kg K	
		Líquido	Vapor	Líquido	Vapor	Líquido	Vapor	Vapor	Líquido	Vapor
		sat.	sat.	sat.	sat.	sat.	vaporiz.	sat.	sat.	sat.
		v <sub>r</sub> x 10 <sup>3</sup>	v <sub>g</sub>	u <sub>r</sub>	u <sub>g</sub>	h <sub>r</sub>	h <sub>fg</sub>	h <sub>g</sub>	s <sub>r</sub>	s <sub>g</sub>
0,04	28,96	1,0040	34,800	121,45	2415,2	121,46	2432,9	2554,4	0,4226	8,4746
0,06	36,16	1,0064	23,739	151,53	2425,0	151,53	2415,9	2567,4	0,5210	8,3304
0,08	41,51	1,0084	18,103	173,87	2432,2	173,88	2403,1	2577,0	0,5926	8,2287
0,10	45,81	1,0102	14,674	191,82	2437,9	191,83	2392,8	2584,7	0,6493	8,1502
0,20	60,06	1,0172	7,649	251,38	2456,7	251,40	2358,3	2609,7	0,8320	7,9085
0,30	69,10	1,0223	5,229	289,20	2468,4	289,23	2336,1	2625,3	0,9439	7,7686
0,40	75,87	1,0265	3,993	317,53	2477,0	317,58	2319,2	2636,8	1,0259	7,6700
0,50	81,33	1,0300	3,240	340,44	2483,9	340,49	2305,4	2645,9	1,0910	7,5939
0,60	85,94	1,0331	2,732	359,79	2489,6	359,86	2293,6	2653,5	1,1453	7,5320
0,70	89,95	1,0360	2,365	376,63	2494,5	376,70	2283,3	2660,0	1,1919	7,4797
0,80	93,50	1,0380	2,087	391,58	2498,8	391,66	2274,1	2665,8	1,2329	7,4346
0,90	96,71	1,0410	1,869	405,06	2502,6	405,15	2265,7	2670,9	1,2695	7,3949
1,00	99,63	1,0432	1,694	417,36	2506,1	417,46	2258,0	2675,5	1,3026	7,3594
1,50	111,4	1,0528	1,159	466,94	2519,7	467,11	2226,5	2693,6	1,4336	7,2233
2,00	120,2	1,0605	0,8857	504,49	2529,5	504,70	2201,9	2706,7	1,5301	7,1271
2,50	127,4	1,0672	0,7187	535,10	2537,2	535,37	2181,5	2716,9	1,6072	7,0527
3,00	133,6	1,0732	0,6058	561,15	2543,6	561,47	2163,8	2725,3	1,6718	6,9919
3,50	138,9	1,0786	0,5243	583,95	2546,9	584,33	2148,1	2732,4	1,7275	6,9405
4,00	143,6	1,0836	0,4625	604,31	2553,6	604,74	2133,8	2738,6	1,7766	6,8959
4,50	147,9	1,0882	0,4140	622,25	2557,6	623,25	2120,7	2743,9	1,8207	6,8565
5,00	151,9	1,0926	0,3749	639,68	2561,2	640,23	2108,5	2748,7	1,8607	6,8212
6,00	158,9	1,1006	0,3157	669,90	2567,4	670,56	2086,3	2756,8	1,9312	6,7600
7,00	165,0	1,1080	0,2729	696,44	2572,5	697,22	2066,3	2763,5	1,9922	6,7080
8,00	170,4	1,1148	0,2404	720,22	2576,8	721,11	2048,0	2769,1	2,0462	6,6628
9,00	175,4	1,1212	0,2150	741,83	2580,5	742,83	2031,1	2773,9	2,0946	6,6226
10,0	179,9	1,1273	0,1944	761,68	2583,6	762,81	2015,3	2778,1	2,1387	6,5863
15,0	198,3	1,1539	0,1318	843,16	2594,5	844,84	1947,3	2792,2	2,3150	6,4448
20,0	212,4	1,1767	0,09963	906,44	2600,3	908,79	1890,7	2799,5	2,4474	6,3409

ANEXO N° 02: Propiedades de los gases de combustión ( Fuente : Tesis ESPE,Diseño y construcción de un intercambiador de calor, Ing.W.Ramirez)

$T$ [° C]	$T$ [° F]	$S.G.$ (565 mm.Hg)	$C_p$ [Btu/lb° F]	$k$ [Btu/h.pie° F]	$\mu$ [centipoises]
0	32	0.000952	0.26162	0.01350	0.01614
20	68	0.000887	0.25783	0.01423	0.01683
40	104	0.000830	0.25577	0.01496	0.01771
60	140	0.000780	0.25483	0.01568	0.01848
80	176	0.000736	0.25495	0.01639	0.01925
100	212	0.000697	0.25559	0.01711	0.02001
120	248	0.000661	0.25668	0.01782	0.02078
140	284	0.000629	0.25804	0.01853	0.02150
160	320	0.000600	0.25964	0.01923	0.02223
180	356	0.000574	0.26138	0.01993	0.02296
200	392	0.000549	0.26322	0.02063	0.02367
220	428	0.000527	0.26512	0.02133	0.02438
240	464	0.000507	0.26705	0.02202	0.02509
260	500	0.000488	0.26899	0.02271	0.02578
280	536	0.000470	0.27092	0.02339	0.02646
300	572	0.000454	0.27284	0.02408	0.02714
320	608	0.000438	0.27472	0.02475	0.02781
340	644	0.000424	0.27658	0.02543	0.02847
360	680	0.000411	0.27840	0.02610	0.02913
380	716	0.000398	0.28048	0.02677	0.02977
400	752	0.000386	0.28192	0.02744	0.03041
420	788	0.000375	0.28362	0.02810	0.03104
440	824	0.000365	0.28527	0.02876	0.03166
460	860	0.000355	0.28688	0.02942	0.03228
480	896	0.000345	0.28845	0.03007	0.03288
500	932	0.000336	0.28988	0.03072	0.03348
520	968	0.000328	0.29146	0.03137	0.03407
540	1004	0.000320	0.29291	0.03201	0.03465
560	1040	0.000312	0.29431	0.03265	0.03522
580	1076	0.000305	0.29568	0.03329	0.03579
600	1112	0.000298	0.29701	0.03392	0.03635
620	1148	0.000291	0.29830	0.03455	0.03690
640	1184	0.000285	0.29956	0.03518	0.03744
660	1220	0.000279	0.30079	0.03581	0.03797
680	1256	0.000273	0.30198	0.03643	0.03850
700	1292	0.000267	0.30314	0.03705	0.03901
720	1328	0.000262	0.30427	0.03766	0.03952
740	1364	0.000257	0.30537	0.03827	0.04003
760	1400	0.000252	0.30644	0.03888	0.04052
780	1436	0.000247	0.30749	0.03949	0.04101
800	1472	0.000242	0.30850	0.04009	0.04148
820	1508	0.000238	0.30950	0.04069	0.04195
840	1544	0.000234	0.31046	0.04128	0.04241
860	1580	0.000229	0.31141	0.04188	0.04287
880	1616	0.000226	0.31233	0.04248	0.04331
900	1652	0.000222	0.31323	0.04305	0.04375
920	1688	0.000218	0.31411	0.04363	0.04418
940	1724	0.000214	0.31496	0.04421	0.04460
960	1760	0.000211	0.31580	0.04479	0.04502
980	1796	0.000208	0.31662	0.04536	0.04542
1000	1832	0.000204	0.31741	0.04593	0.04582

S.G. : Densidad específica respecto al agua.

1 Btu/lb° F = 4.186 KJ/Kg° K

1 Btu/h.° F.pie = 1.733 w/m° K

ANEXO Nº 03: Conductividad térmica de líquidos

$$k = \lambda / (h)(\rho t e^2) (\cdot F / \rho t e)$$

Puede suponerse una variación lineal con la temperatura. Los valores extremos que se dan constituyen también los límites de temperatura en los cuales se recomiendan los datos.

Líquido	°F	k	Líquido	°F	k
Aceites			Bromobenceno	86	0.074
Ricino	88	0.104		212	0.070
Oliva	88	0.087		88	0.108
	212	0.095	Bisulfuro de carbono	86	0.111
Acetato de etilo	88	0.101		167	0.088
Alcohol 100%	68	0.105	Tetracloruro	32	0.107
80%	68	0.137		154	0.094
60%	68	0.176	Cloruro de calcio, salmuera 30%	86	0.32
40%	68	0.234	15%	86	0.34
20%	68	0.281	Cloruro de sodio, salmuera 25.0%	86	0.33
100%	122	0.087	12.5%	86	0.34
Benceno	86	0.086	Clorobenceno	50	0.083
Bromuro	140	0.082	Cloroforoma	86	0.080
Eter	68	0.070	Cymene (para)	86	0.078
	167	0.080		140	0.079
Yoduro	167	0.078	Hexano (n-)	86	0.085
	104	0.064		140	0.083
Acetato de amilo	167	0.063	Diclorodifluorometano	20	0.057
Alcohol (n-)	50	0.043		60	0.053
	86	0.034		100	0.048
	212	0.089		140	0.043
	86	0.088		180	0.038
	167	0.087	Dicloroetano	122	0.082
Acetato butílico (n-)	77-86	0.085	Diclorometano	5	0.111
Alcohol (n-)	86	0.097		86	0.096
	167	0.095	Eter de petróleo	86	0.073
(iso-)	68	0.091		167	0.073
Aceites	86	0.102	Etilen glicol	32	0.153
	167	0.095	Gasolina	86	0.078
Acido acético 100%	68	0.999	Glicerina 100%	68	0.164
80%	68	0.20	80%	68	0.189
Acido esteárico	212	0.0786	60%	68	0.220
Acido láurico	212	0.102	40%	68	0.259
Acido oleico	212	0.0925	20%	68	0.278
Acido palmítico	212	0.0835	100%	212	0.164
Acido sulfúrico 90%	86	0.21	Heptano (n-)	86	0.081
80%	86	0.25		140	0.079
50%	86	0.30	Hexano (n-)	86	0.080
Agua	32	0.330		140	0.078
	86	0.356	Kerosena	68	0.086
	167	0.381		167	0.081
	176	0.398	Mercurio	82	4.83
Alcohol alílico	77-86	0.104	Nitrobenceno	86	0.095
Alcohol bupílico (n-)	86	0.094		212	0.088
	167	0.091	Nitrometano	86	0.125
Alcohol hexílico (n-)	86	0.093		140	0.120
	167	0.090	Nonano (n-)	86	0.084
Alcohol metílico 100%	68	0.124		140	0.082
80%	68	0.159	Octano (n-)	86	0.083
60%	68	0.190		140	0.081
40%	68	0.234	Paraldehído	86	0.084
20%	68	0.284		212	0.078
100%	122	0.114	Pentano (n-)	86	0.078
Cloruro	5	6.111		167	0.074
	86	1.080	Percloroetileno	122	0.092
Alcohol propílico (n-)	86	1.099	Sodio	212	49
	167	1.095		410	46
Alcohol (iso-)	86	1.091	Tolueno	86	0.086
	140	1.090		167	0.084
Amoniaco	5-86	1.25	o-tricloroetano	122	0.077
Amoniaco, acuoso, 26%	68	1.061	Tricloroetileno	122	0.080
	140	1.03	Tri-n-butano (aguardiente)	59	0.074
Anilina	32-68	1.100	Xileno	59	0.106
Benceno	68	0.082	Xileno (orto-)	68	0.090
	140	2.087	Xileno (meta-)	68	0.090

\* D. S. Ferry, J. H., "Chemical Engineers' Handbook", 3rd ed., McGraw-Hill Book Company Inc., New York, 1960.

ANEXO Nº 04: Calores específico de líquidos

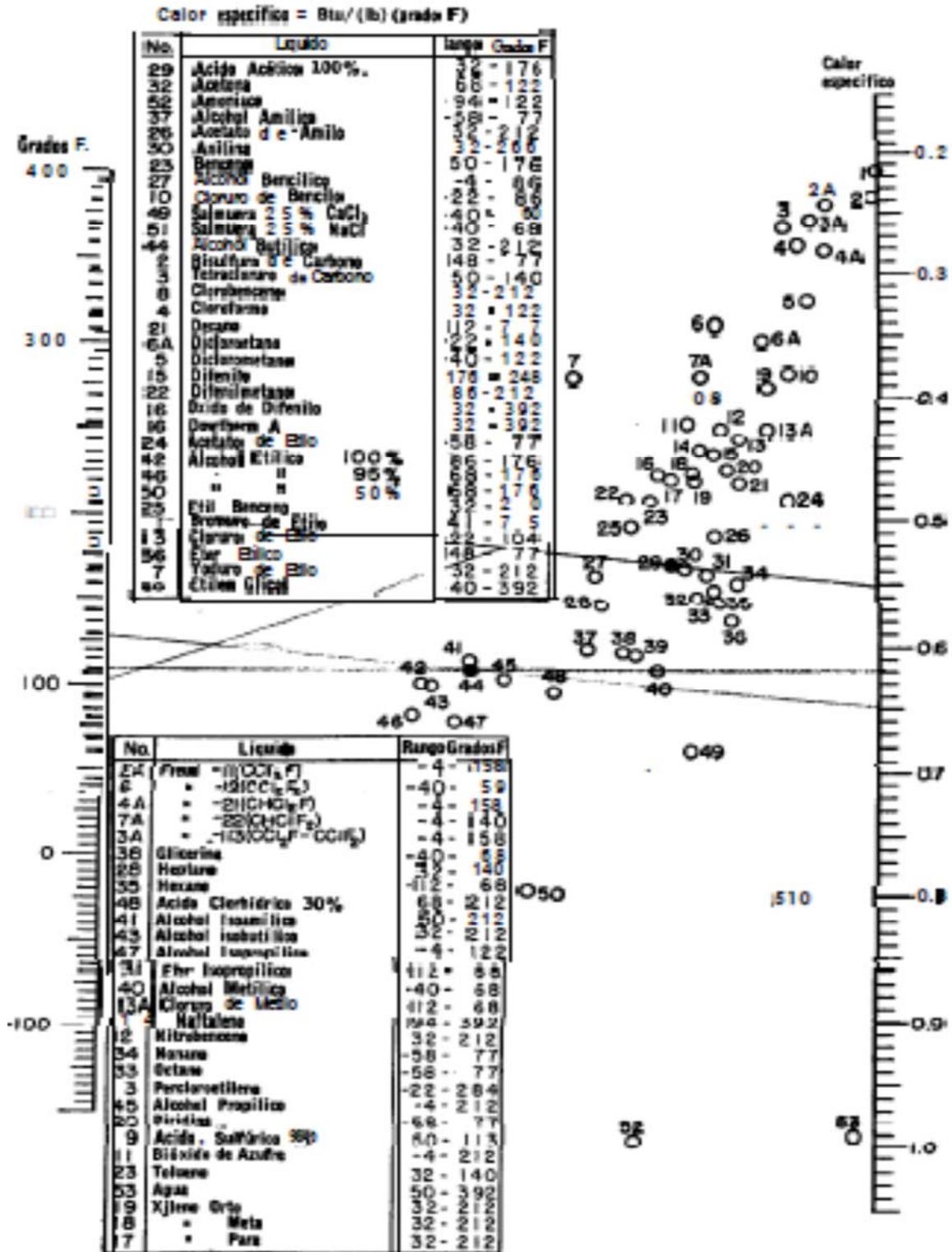


FIG. 2. Calores específicos de líquidos. (Chilton, Colburn, and Vernon, basados principalmente en datos de las Tablas Internacionales de Valores Críticos. Perry "Chemical Engineers' Handbook", 3d ed., McGraw-Hill Book Company, Inc. New York, 1950)

ANEXO Nº 05: Viscosidades de Líquidos

VISCOSIDADES DE LIQUIDOS\*  
Para usarse como Coordenadas con la Fig. 14

Líquido	x	Y	Líquido	X	Y
Acetaldehído	15.2	4.8	Cloruro Estánico	13.5	12.8
Acetato de Amilo	11.8	12.5	Cresol, meta	2.5	20.8
Acetato de Butilo	12.3	11.0	Dibromoetano	12.7	15.8
Acetato de Etilo	13.7	9.1	Dicloroetano	13.2	12.2
Acetato de Metilo	14.2	8.2	Diclorometano	14.8	8.9
Acetato de Vinilo	14.0	8.8	Difenilo	12.0	18.3
Acetona 100%	14.5	7.2	Eter Etilico	14.5	5.3
Acetona 35 %	7.9	10.9	Etilbenceno	13.2	11.5
Agua	10.2	13.0	Etilenglicol	6.0	23.6
Acido Acético 100%	12.1	14.2	Fenol	6.9	20.8
Acido Acético 70%	9.5	17.0	Formiato de Etilo	14.2	8.4
Acido Butirico	12.1	15.3	Freon 11	14.4	9.0
Acido Clorosulfónico	11.2	18.1	Freon 12	16.8	5.6
Acido Formico	10.7	15.8	Freon 21	15.7	7.5
Acido Isobutirico	12.2	14.4	Freon 22	17.2	4.7
Acido Nitrico 95%	12.8	13.8	Freon 113	12.5	11.4
Acido Nitrico 60%	10.8	17.0	Freon 114	14.6	8.3
Acido Propiónico	12.8	13.8	Glicerina 100%	2.0	30.0
Acido Sulfurico 110%	7.2	27.4	Glicerina 50%	6.9	19.6
Acido Sulfurico 98%	7.0	24.8	Heptano	14.1	8.4
Acido Sulfurico 60%	10.2	21.3	Hexano	14.7	7.0
Alcohol Alilico	10.2	14.3	Hidróxido de Sodio 50%	3.2	25.2
Alcohol Amilico	7.5	18.4	Yoduro de Etilo	14.7	10.3
Alcohol Butilico	8.6	17.2	Yoduro de Propilo	14.1	11.6
Alcohol Etilico 100%	10.5	13.8	Isobutano	14.5	3.7
Alcohol Etilico 95%	9.8	14.3	Mercurio	18.4	16.4
Alcohol Etilico 40%	6.5	16.6	Metanol 100%	12.4	10.5
Acido Clorhidrico 31.5%	13.0	16.6	Metanol 90%	12.3	11.8
Alcohol Isobutilico	7.1	18.0	Metanol 40%	7.8	15.5
Alcohol Isopropilico	8.9	16.0	Metilacetona	13.9	8.6
Alcohol Octilico	6.2	21.1	Naftaleno	7.9	18.1
Alcohol Propilico	9.1	16.5	Nitrobenceno	10.6	116.2
Amoniaco 100%	12.6	2.0	Nitrotolueno	11.0	17.0
Amoniaco 26 %	10.1	13.9	Octano	13.7	10.0
Anhidrido Acético	12.7	12.8	Oxalato de Dietilo	11.0	16.4
Anilina	8.1	18.7	Oxalato de Dimetilo	12.3	15.8
Anisol	12.3	13.5	Oxalato de Dipropilo	10.3	17.7
Benceno	12.5	10.9	Pentacloroetano	10.9	17.3
Bióxido de Azufre	15.2	7.1	Pentano	14.9	5.2
Bióxido de Carbono	11.6	0.3	Propano	15.3	1.0
Bisulfuro de Carbono	16.1	7.5	Salmuera CaCl <sub>2</sub> 25%	6.6	16.9
Bromo	14.2	13.2	Salmuera NaCl 25%	10.2	16.6
Bromotolueno	20.0	15.9	Sales	16.4	13.9
Bromuro de Etilo	14.5	8.1	Tetracloroetano	11.9	15.7
Bromuro de Propilo	14.5	9.6	Tetracloroetileno	14.2	12.7
n-Butano	15.3	3.3	Tetracloruro de Carbono	12.7	13.1
Ciclohexanol	2.9	24.3	Tetracloruro de Titanio	14.4	12.3
Clorobenceno	12.3	12.4	Tribromuro de Fosforo	13.8	16.7
Clorofoma	14.4	10.2	Tricloruro de Arsénico	13.9	14.5
Clorotolueno, orto	13.0	13.3	Tricloruro de Fosforo	16.2	16.9
Clorotolueno, meta	13.3	12.5	Tricloroetileno	14.8	10.5
Clorotolueno, para	13.3	12.5	Tolueno	13.7	10.4
Cloruro de Etilo	14.8	6.0	Turpentina	11.5	14.9
Cloruro de Metilo	15.0	3.8	Xileno, orto	13.5	12.1
Cloruro de Propilo	14.4	7.5	Xileno, meta	13.9	12.1
Cloruro de Sulfurilo	15.2	12.4	Xileno, para	13.9	10.9

\* De Perry, J. H., "Chemical Engineers' Handbook 3d. ed. McGraw-Hill Book Company, Inc., New York, 1950.

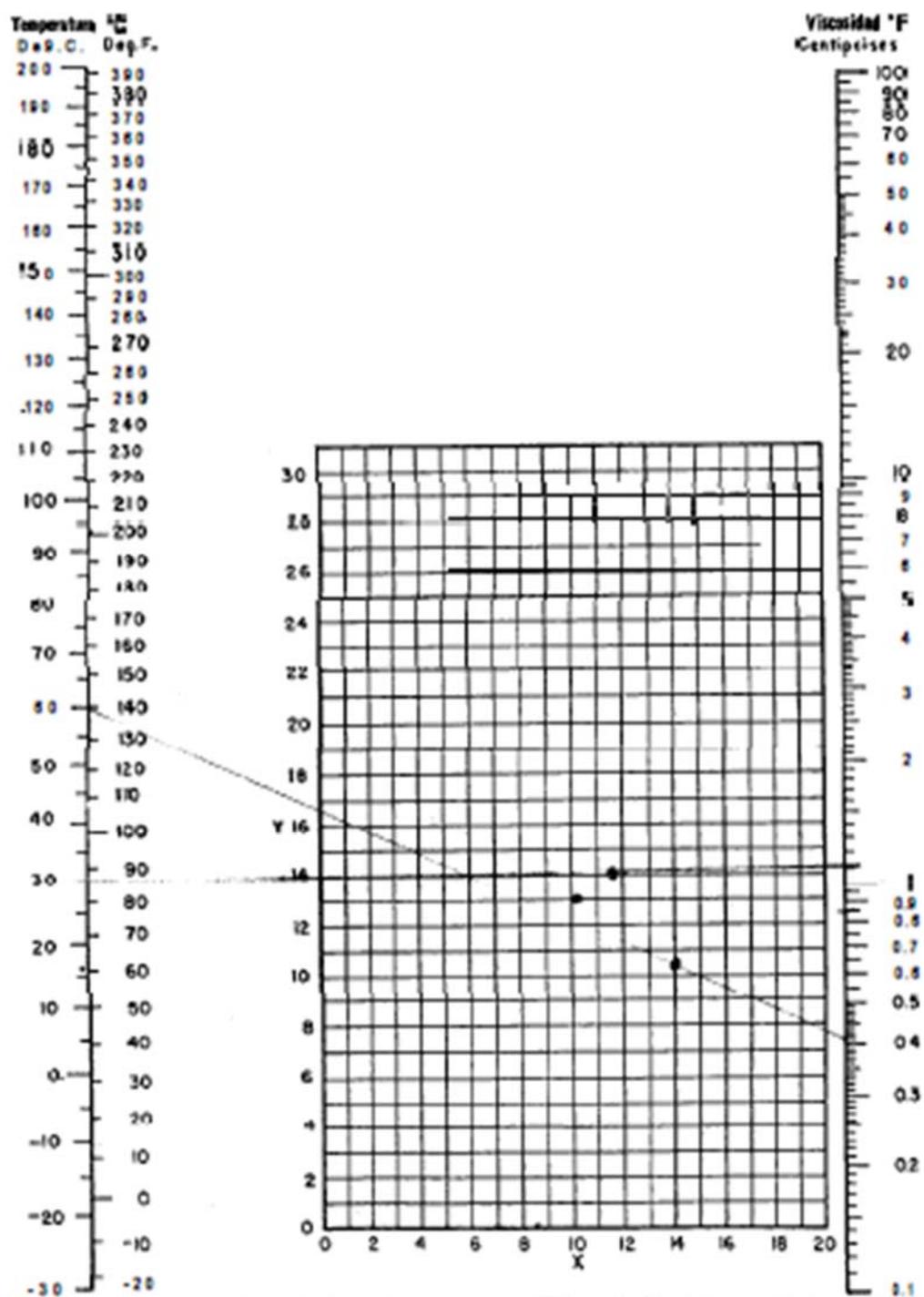
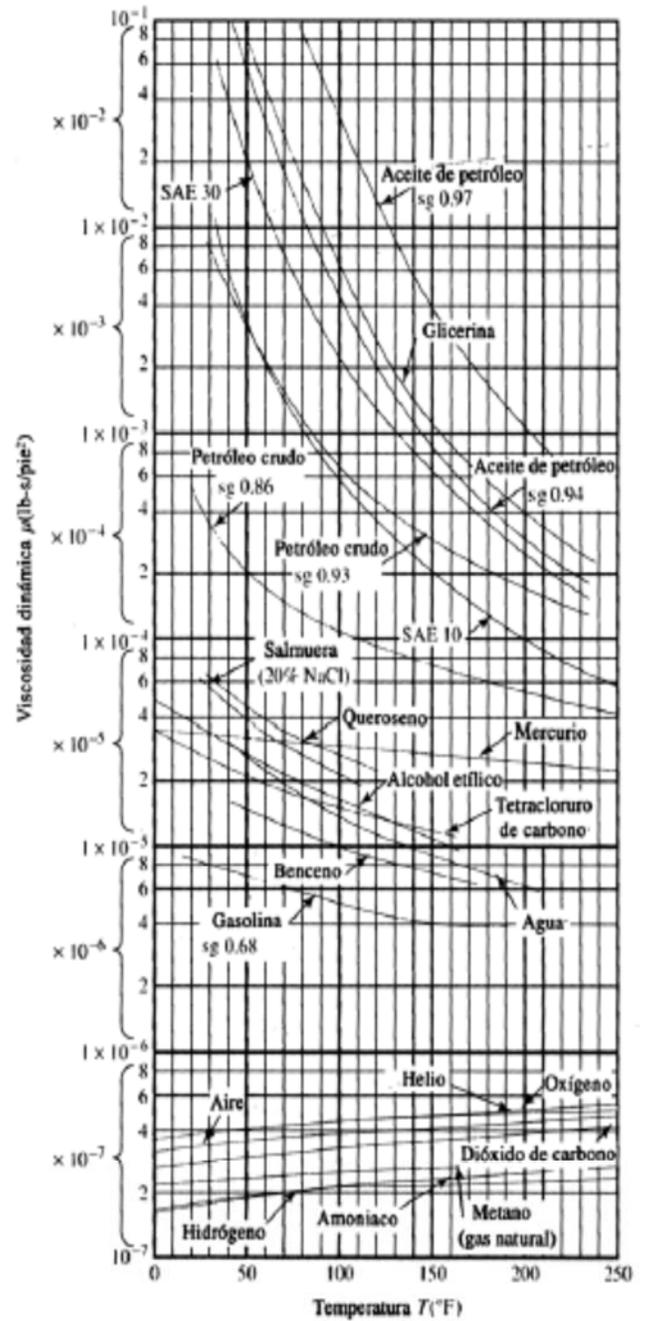
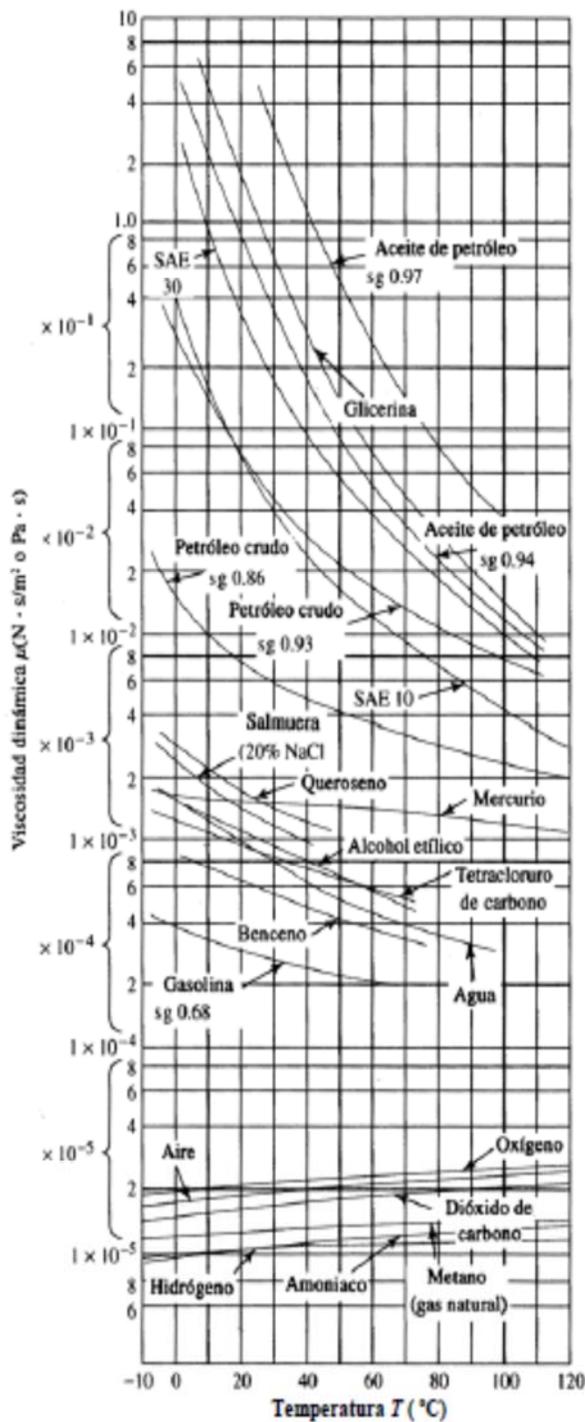


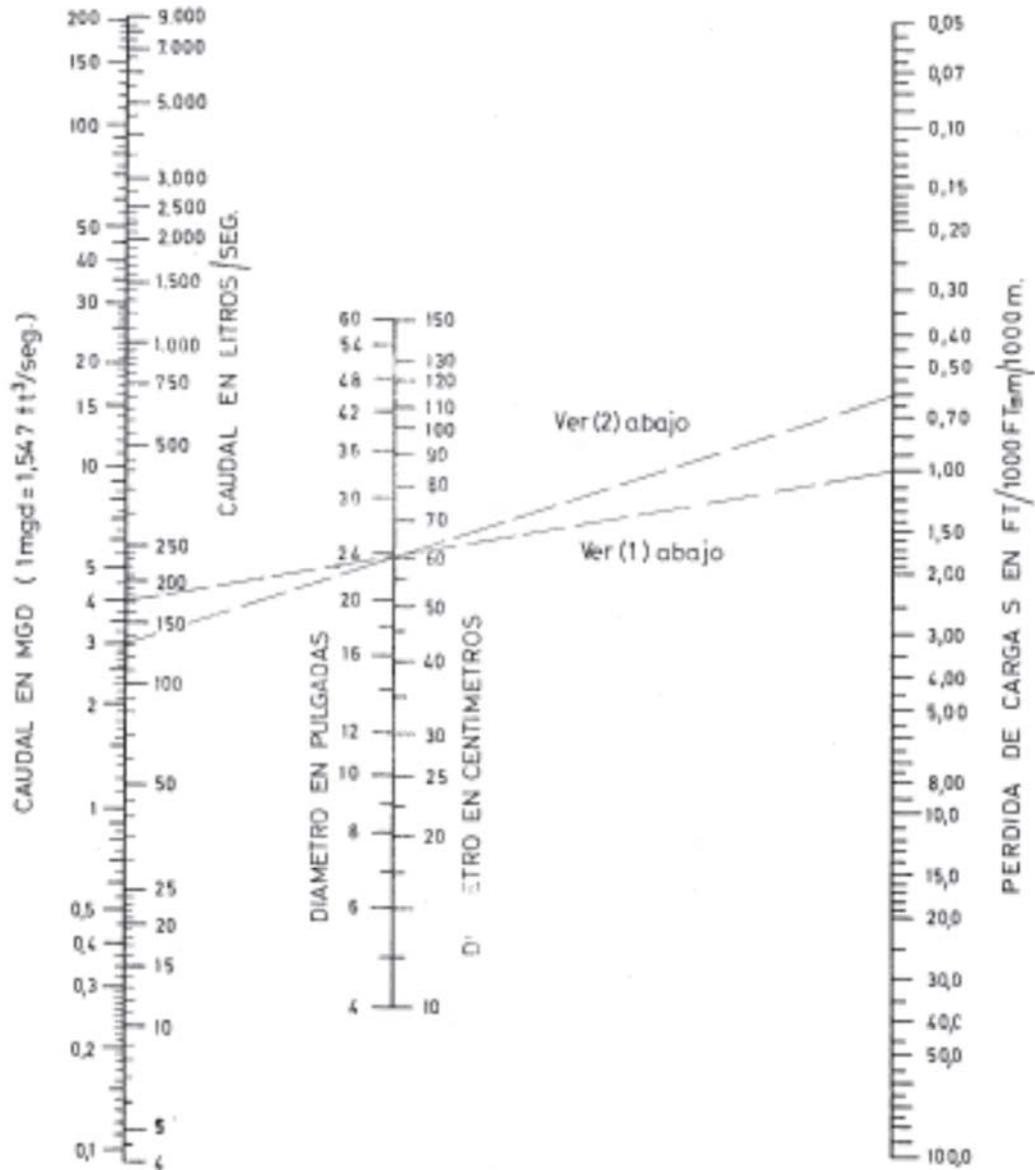
FIG. 14. Viscosidades de líquidos. (Perry, "Chemical Engineers' Handbook", 3a. ed. McGraw-Hill Book Company, Inc., New York, 1950)

ANEXO Nº 06: Variación De La Viscosidad Con La Temperatura



ANEXO Nº 07: Monografía de Caudal

FORMULA DE HAZEN-WILLIAMS,  $C_1 = 100$



UTILIZACION DEL MONOGRAMA

- (1) Dado  $D=60\text{cm}$ ,  $S=1,0\text{m}/1000\text{m}$ ,  $C_1=120$ ; determinar el caudal  $Q$ .  
 El nomograma da  $Q_{100}=170\text{ l/seg}$ .  
 Para  $C_1=120$ ,  $Q = (120/100) 170 = 204\text{ l/seg}$ .
- (2) Dado  $Q=156\text{ l/seg}$ ,  $D=60\text{cm}$ ,  $C_1=120$ ; determinar la pérdida de carga.  
 Cambiando  $Q_{120}$  a  $Q_{100}$ :  $Q_{100} = (100/120) 156 = 130\text{ l/seg}$ .  
 El nomograma da  $S=0,60\text{m}/1000\text{m}$ .

ANEXO Nº 08: Curvas de transferencia de calor para lado de la Coraza

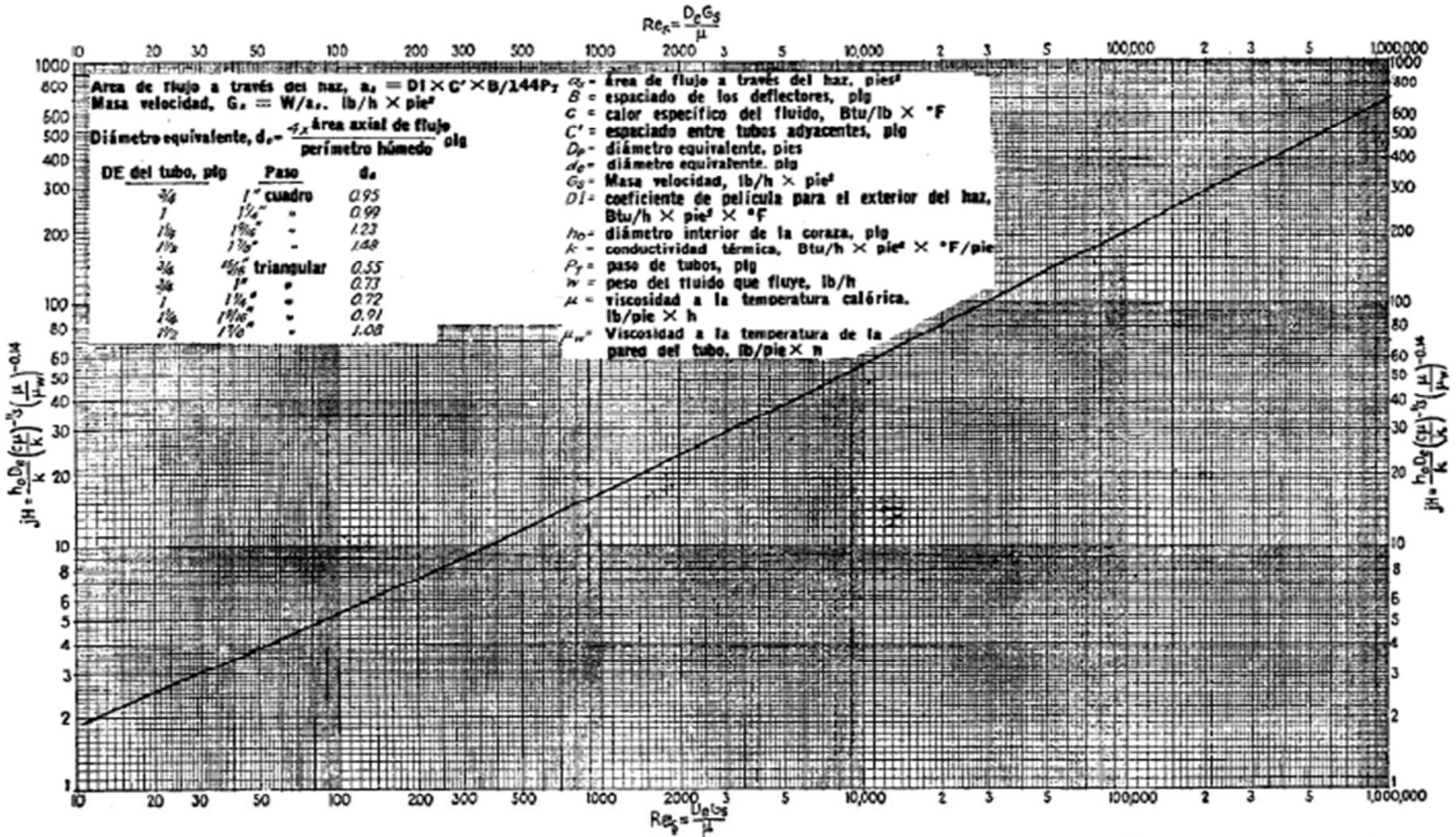


FIG. 28. Curva de transferencia de calor para lado de la coraza con haz de tubos con deflectores segmentados 25%

ANEXO Nº 09: Diagrama de Moody

**Ecuación de Darcy**

$$h_L = f \times \frac{L}{D} \times \frac{v^2}{2g} \Rightarrow \begin{cases} \text{- Régimen laminar: } f = \frac{64}{Re} & \text{(Ley de Poiseuille)} \\ \text{- Régimen turbulento: diagrama de Moody} \end{cases}$$

Material	Rugosidad, $\epsilon$ (m)
Vidrio, plástico	0.0 (suave)
Cobre, latón, plomo (tubería)	$1.5 \times 10^{-6}$
Hierro fundido: sin revestir	$2.4 \times 10^{-4}$
Hierro fundido: revestido de asfalto	$1.2 \times 10^{-4}$
Acero comercial o acero soldado	$4.6 \times 10^{-5}$
Hierro forjado	$4.6 \times 10^{-6}$
Acero remachado	$1.8 \times 10^{-3}$
Hormigón	$1.2 \times 10^{-3}$

**Diagrama de Moody**

