

118
2 es.



Universidad Nacional Autónoma de México



FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
CUAUTITLAN

11/10/85
C. U. N. A. M.
M. I. G.

"Diseño mecánico de un precalentador de aire-agua de purga"

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA
P R E S E N T A :
ELOY MARIANO TALONIA FRANCISCO

Asesores:

M en I. Felipe Díaz del Castillo
Ing. Hermenegildo Rojas Chavez

Cuautitlán Izcalli, Edo. de México

1998

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

26 81 65



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MEXICO
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN
UNIDAD DE ADMINISTRACION ESCOLAR
DEPARTAMENTO DE EXAMENES PROFESIONALES

ASUNTO: VOTOS APROBATORIOS

U. N. A. M.
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA
SECRETARÍA DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR

DR. JUAN ANTONIO MONTARAZ CRESPO
DIRECTOR DE LA FES-CUAUTITLAN
P R E S E N T E.

ATN.: Q. M. DEL CARMEN GARCIA MIJARES
JEFE DEL DEPARTAMENTO.

DEPARTAMENTO DE
EXAMENES PROFESIONALES

Con base al artículo 28 del Reglamento General de Exámenes, nos permitimos comunicar a Usted que revisamos el TRABAJO de Tesis con el nombre de:

"Diseño mecánico de un precalentador de aire-agua de purga".

que presenta el pasante: TALONIA FRANCISCO ELOY MARIANO
con número de cuenta : 9256640-6 para obtener el Título de :

INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutida en el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APROBATORIO.

A T E N T A M E N T E.

"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"

Cuatitlán Izc., México, a 14 de Octubre de 1998

Presidente ING. FILIBERTO LEYVA PIÑA

Vocal ING. JOSE ANTONIO SANCHEZ GUTIERREZ

Secretario M.I. FELIPE DIAZ D CASTILLO RODRIGUEZ

1er. Sup. ING. DANIEL BONILLA SAPIEN

2do. Sup. ING. MARIA TERESA PACHECO ESCALONA

A mis padres.

INDICE

	Pag.
Introducción.	1
Antecedentes.	2
Objetivos.	4
Capítulo 1. Generalidades.	
1.1. Calderas.	5
1.1.1. Tipos de generadores de vapor.	7
1.1.2. Calderas de tubos de agua.	9
1.1.2.1. Calderas horizontales de tubos rectos.	10
1.1.2.2. Calderas de tubos curvados.	10
1.2. Purga en calderas.	11
1.3. Precalentadores de aire.	14
1.3.1. Clasificación.	16
1.3.2. Diseño y aplicación.	19
1.3.3. cuidado de los precalentadores de aire.	21
1.4. ¿Qué es un precalentador de aire-agua de purga.	22
Capítulo 2. Selección del material.	
2.1. Materiales de uso común.	25
2.2. Corrosión en el PAAP.	27
Capítulo 3. Diseño mecánico de los elementos que componen un PAAP.	
3.1. El serpentín de tubos.	36
3.2. Diseño de espejos.	45
3.3. Diseño de sellos.	47
3.4. Diseño de la carcasa.	50
3.5. Sistemas de aislamiento.	54
Planos de ingeniería de detalle.	58
Capítulo 4. Procesos de fabricación.	
4.1. Soldadura en serpentines.	63
4.2. Prueba hidrostática.	64
4.3. Tratamientos térmicos.	65
4.4. Prueba de hermeticidad del equipo.	65
4.5. Embarque del equipo.	66
Capítulo 5. Fabricación y pruebas del prototipo.	
5.1. Materiales utilizados en la fabricación.	68
5.2. Proceso de aplicación de soldadura en serpentines.	68

5.3. Etapa de montaje.	69
5.4. Circuito de prueba del PAAP.	71
5.5. Desarrollo del experimento.	73
Conclusiones.	79
Bibliografía.	81
Anexo A. Criterios de diseño termohidráulico.	83
Anexo B. Gráficas de esfuerzo.	91
Anexo C. Glosario de términos.	94

INTRODUCCIÓN.

Actualmente, la energía requerida por cualquier proceso industrial se obtiene por combustión de hidrocarburos, desafortunadamente estos compuestos incrementan su precio constantemente y afectan en forma negativa al medio ambiente.

En las plantas de refinación y petroquímica, los equipos de combustión, tales como calderas y calentadores a fuego directo, son los principales consumidores de energía.

Debido a esto el diseño de equipos de recuperación de energía térmica residual se toma esencial para incrementar la eficiencia térmica, y por supuesto los costos de operación, de estos equipos; que utilizan como combustibles al combustóleo, diesel y gas natural, entre otros.

Una de las tecnologías de ahorro de energía de mayor éxito consiste en precalentar el aire de combustión con la energía de los gases, producto de la combustión.

Durante este proceso es común encontrar puntos fríos en los cuales, debido a la condensación de compuestos ácidos, se presenta una corrosión acelerada en el equipo. Para evitar esto, en algunos equipos se adiciona un precalentador de aire-vapor, con el propósito de evitar que el aire que entra al Precalentador aire-gases tenga una temperatura demasiado baja, lo cual implica un consumo adicional de vapor, ocasionando un aumento en los costos de operación del equipo de combustión.

En instalaciones de Servicios Auxiliares, donde se utilizan calderas de tubos de agua, sería posible eliminar este consumo adicional de vapor

sustituyendo el precalentador de aire-vapor por un precalentador de aire-agua de purga. Con esto se conseguiría el ahorro de un energético valioso, y se aprovecharía la energía térmica de una corriente residual (purga continua); que de otro modo se perdería en el drenaje.

Antecedentes.

Dentro del marco de modernización de la industria petrolera nacional, PEMEX ha realizado grandes esfuerzos para incorporar y/o desarrollar tecnologías que aplicadas en sus esquemas de proceso de refinación y equipos de proceso reduzcan los costos de operación, así como los impactos ambientales negativos y las tasas de consumo de recursos energéticos.

Básicamente, PEMEX ha desarrollado este esfuerzo con el apoyo tecnológico del Instituto Mexicano del Petróleo, a través de proyectos de desarrollo tecnológico, administrados y promovidos por la Gerencia de Investigación Tecnológica de PEMEX-Refinación.

Siendo los procesos de combustión de hidrocarburos la fuente principal de energía primaria del sistema de refinación nacional y una de las áreas con mayor potencial de aprovechamiento de la energía residual, se desarrolló el proyecto denominado "Desarrollo de la Tecnología para el Diseño de Recuperadores de Energía Térmica Residual", en un esfuerzo por aumentar la eficiencia térmica de los equipos a combustión, que emplean grandes cantidades de combustible.

Los economizadores son uno de los equipos genéricos que ha sido desarrollados para el aprovechamiento de la energía residual. Generalmente estos equipos recuperan la energía con base a fenómenos de transferencia de calor de tipo convectivo, a través del precalentamiento de corrientes de proceso, aire de combustión y agua.

Estos equipos de recuperación de energía han rendido sus beneficios en calderas que utilizan combustibles fósiles, biomasa o desechos combustibles, máquinas reciprocantes, hornos de proceso y combustores de lecho fluidizado, turbinas de combustión, incineradores, entre otros.⁽¹⁾

Básicamente un economizador es un equipo de intercambio térmico que al precalentar las corrientes de proceso o servicios hacia los equipos de combustión, mediante el aprovechamiento del calor residual, incrementa la eficiencia térmica del equipo con la consecuente disminución del consumo de energía primaria y la reducción de emisiones contaminantes.

La selección de la corriente que se beneficiará del calor residual depende del impacto económico que provocará al incrementar su contenido energético; así como de su nivel de temperatura con respecto a la temperatura de la corriente térmica residual.

Con base al mecanismo de transferencia de calor involucrado, en el lado del fluido portador del calor residual, los economizadores pueden clasificarse de la siguiente manera:

- I. Economizadores de calor sensible.
- II. Economizadores de calor latente.
- III. Economizadores mixtos.

I. Economizadores de calor sensible. En estos, únicamente se aprovecha el calor sensible de la corriente de desecho; y se cuenta a los siguientes:

A. Economizadores de agua de alimentación a calderas.

B. Precalentadores de aire.

C. Generadores de vapor.

D. Sobrecalentadores de vapor de agua.

II. Economizadores de calor latente. Dentro de estos, en los que de manera principal se aprovecha el calor latente de los compuestos condensables de la corriente térmica residual, se cuentan los siguientes:

A. Economizadores condensantes.

B. Precalentadores de aire condensantes.

III. Economizadores mixtos. Dentro de los economizadores mixtos, en los que se aprovecha el calor sensible de la corriente residual y el calor latente del vapor de agua contenido en ésta, se cuentan los siguientes:

A. De contacto directo.

B. De contacto indirecto.

Objetivos.

Los objetivos que persigue el presente trabajo de tesis son los que a continuación se mencionan:

1. Describir el funcionamiento de un Precalentador de Aire Agua de Purga (PAAP).
2. Describir los parámetros de diseño mecánico para los elementos que componen a un Precalentador de Aire-Agua de Purga.
3. Analizar los beneficios que resultaran de aplicar un Precalentador de este tipo a un equipo de combustión.

CAPITULO 1. GENERALIDADES.

1.1. Calderas.

El término caldera se aplica a un equipo, que por principio convierte la energía de un combustible en calor latente de vaporización, con el fin de generar vapor para fuerza, procesos industriales o calefacción.

Esto es, las calderas son diseñadas para transmitir el calor procedente de una fuente externa (combustión de algún combustible), a un fluido contenido dentro de la misma caldera.

Si este fluido no es agua ni vapor a la unidad se la clasifica como calentador de líquidos térmicos. De cualquier carácter que sea, este líquido debe estar dentro del equipo con las debidas medidas de seguridad. El vapor o agua caliente, deben ser alimentados a la presión, temperatura, cantidad y calidad requeridos para una aplicación particular. Por razones de economía el vapor debe ser generado y suministrado con un mínimo de pérdidas.

La unidad generadora se compone de un fogón (cámara de fuego u hogar) en el que se quemará el combustible, así como la caldera propiamente dicha. En las unidades del tipo paquete, como en las grandes centrales de fuerza, están comprendidos también los quemadores de combustible, al igual que los controles y accesorios similares.

En la definición técnica escueta, se comprende como caldera únicamente al cuerpo que forma el recipiente y las superficies de calefacción por convección. Sin embargo; con la aparición de paredes enfriadas por agua para el fogón, sobrecalentadores, calentadores de aire y economizadores; se creó el término "generador de vapor", para

dar al equipo una denominación más apropiada. Cuando el hogar es contenido, la palabra caldera se sobreentiende que describe a la unidad generadora de vapor en su conjunto.

La capacidad de producción de vapor, cantidad de vapor por hora, depende de los siguientes factores:

1. Grado de combustión.
2. Extensión de la superficie de calefacción.
3. Proporción en la que se distribuye la superficie, en áreas de calefacción primarias (calor radiante) y secundarias (calor por convección).
4. La circulación del vapor y los gases de combustión.

Para mantener la combustión es necesario suministrar cierta cantidad de aire y remover los productos resultantes de dicha combustión, mediante un sistema de tiro. Existen tres tipos de tiro, a saber: Tiro natural, forzado e inducido.

En las grandes unidades generadoras de vapor, el aire para la combustión y el agua de alimentación son precalentados, por medio de el calor residual de los gases de la combustión. Para esto se utilizan equipos tales como los precalentadores de aire y economizadores, respectivamente. Estos dispositivos mejoran el rendimiento general de la unidad. Si se desea sobrecalentar el vapor por encima de la temperatura de saturación, se agrega a la caldera un sobrecalentador. Dispositivos de tubos antiespumantes y otros mecanismos, de montaje interno, eliminan las gotas de agua contenidas en el vapor.

El agua es alimentada a la caldera ya sea por gravedad en el retorno o por bomba de alimentación.

En las calderas de vapor, el agua absorbe calor hasta su punto de ebullición; una vez convertida el agua en vapor, se acumula en la parte más alta de la caldera por diferencia de densidades entre el vapor y el agua.

1.1.1. Tipos de generadores de vapor.

Básicamente, hay dos tipos generales de calderas generadoras de vapor, a saber: las calderas de tubos de humo y las calderas de tubos de agua.

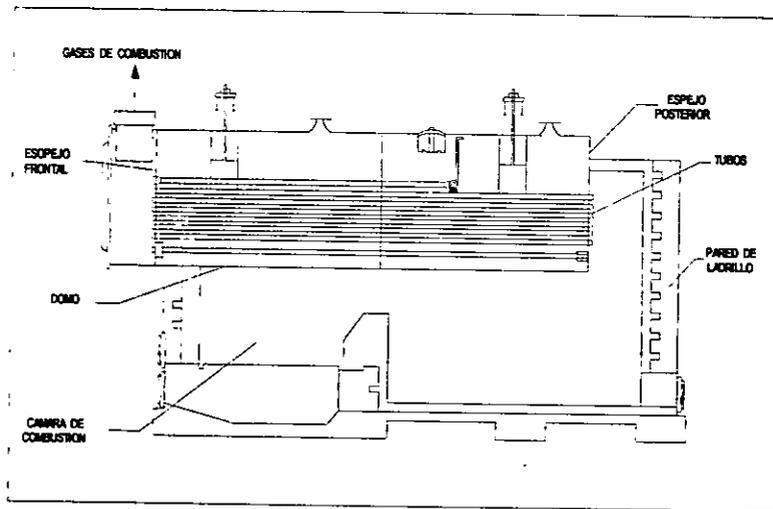


FIGURA 1. Caldera de tubos de humo

El primer tipo consiste de recipientes cilíndricos que tienen tubos que pasan a lo largo de ellos y que se rolan a los cabezales del recipiente. El haz de tubos, generalmente es horizontal, y la parte superior del recipiente no tiene tubos. Los gases de la combustión pasan a través de los tubos y en el recipiente se mantiene cierto nivel de agua para tener

los tubos completamente sumergidos en ella, pero al mismo tiempo se dispone de espacio para permitir la separación del vapor y las gotas de agua.

Cuando se usan tubos verticales en calderas de este tipo, los tubos deben sumergirse en agua hasta una altura suficiente para reducir la temperatura de los gases y evitar un sobrecalentamiento de la parte superior de los tubos que no está enfriada por el agua.

El principal mecanismo de transferencia de calor de los gases de combustión a los tubos es mediante convección.

Las calderas de tubos de humo raras veces exceden a los 8 pies de diámetro (2.4m), y la presión de vapor generalmente se limita de 100 a 150 lb/plg² (7 a 10.5 Kg/cm²). Este tipo de calderas se usan para demandas de baja capacidad, generalmente de 15 000 a 20 000 lb/h (6800 a 9000 Kg/h) de vapor para uso industrial, domestico o de proceso y para generación de potencia en pequeña escala.

Las calderas de tubos de agua, como lo indica su nombre transportan agua dentro de los tubos. El quemado del combustible provee la radiación para los tubos, además de la transferencia de calor que se efectúa mediante el arreglo del flujo de gases calientes para lograr transferencia de calor por convección.

Ya que las calderas de tubos de agua son ampliamente utilizadas para servicios auxiliares en refinerías y que debido a su gran capacidad permiten obtener una purga continúa, que es la fuente de energía residual que se trata de aprovechar en el precalentador de aire-agua de purga, a continuación describiremos este tipo de calderas con más detalle.

1.1.2. Calderas de tubos de agua.

La caldera acuotubular (Fig. 2) se compone de tubos y domos; los tubos, que sirven para interconectar los domos, quedan localizados en la parte exterior con relación a éstos. Los domos tienen la misión de almacenar agua y vapor; y ya que no necesitan tener ninguna superficie tubular de calefacción, pueden fabricarse en diámetros menores que los utilizados en calderas de tubos de humo y, por consiguiente, pueden construirse para soportar presiones más altas.

La superficie de calor queda circunscrita exclusivamente a los tubos. Estas calderas tienen circulación natural de agua, con excepción de los diseños hechos especialmente para circulación forzada o controlada.

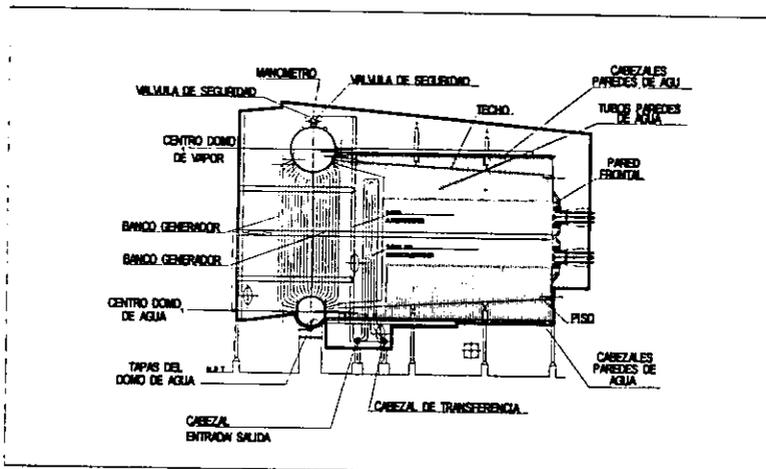


FIGURA 2. Esquema de una caldera de tubos de agua.

Las calderas acuotubulares se clasifican de la siguiente manera:

1. Calderas horizontales de tubos rectos.
2. Calderas de tubos corvados.

1.1.2.1. Calderas horizontales de tubos rectos.

Este tipo de calderas tienen una producción limitada de 4 536 kg/h (10000 lb/h) de vapor por cada 305 mm (1 pie) de ancho de caldera. Su diseño es sencillo y sus pérdidas en el tiro son bajas.

Dentro de este tipo de calderas el vapor y el agua se elevan a lo largo de los tubos inclinados hacia los cabezales frontales, ascendiendo por éstos para elevarse por los tubos de circulación hasta el domo. De aquí, el agua pasa a través de los tubos de bajada hacia los cabezales posteriores, de donde entran a los tubos para completar el ciclo.

La caldera horizontal de tubos rectos es adaptable para su operación con aceites combustibles, gas, carbón, bagazo o leña. Los métodos de combustión pueden incluir quemadores de aceite o gas y alimentación manual o mecánica. Rara vez se utiliza carbón pulverizado.

1.1.2.2. Calderas de tubos corvados.

Las calderas de tubos corvados ofrecen, frente a las de tubos rectos, muchas ventajas, entre las que destacan las siguientes:

1. Mayor economía en su fabricación y operación, debido al uso de soldadura, empleo de aceros aleados y paredes de agua.
2. Mejor acceso para inspección, limpieza y servicios de mantenimiento.
3. Trabaja con mayor capacidad de evaporación y entrega vapor más seco.

Los elementos principales de que se componen las calderas de este tipo (y los diseños que se derivan de la misma) son domos interconectados por tubos curvados. Tienen un fogón con enfriamiento de agua, los tubos curvados se colocan de manera que circunden el hogar, incorporándolo como una parte integral de la caldera.

Este tipo de calderas mantiene una capacidad en una proporción de 29756 kg (13500 lb/h) de vapor por hora, por metro de ancho de caldera.

Estas calderas son de paredes refractarias o enfriadas por agua, las que algunas veces se construyen de acero, a manera de caja para operarse sin presión. Su ensamble tiene que hacerse en la obra (las unidades pequeñas se embarcan ya armadas).

Los domos están protegidos contra el calor radiante del fuego, y se diseñan de tal manera que los sedimentos se depositen fuera de la zona de circulación rápida. Con excepción del hogar integral de paredes de agua, sus proporciones son alterables para satisfacer las variaciones que se presenten en aplicaciones particulares. Así, el aumento de la capacidad de la caldera se obtiene sin aumentar el diámetro de los domos.

La caldera de tubos curvados es un vaporizador rápido; su reacción a las fluctuaciones de la carga es rápida por su volumen relativamente reducido, en comparación con su capacidad generadora de vapor. Esta flexibilidad en la evaporación es sostenida sin llegar a un esfuerzo excesivo.

Estas calderas se adaptan, también, para operar con aceites combustibles, gas carbón, bagazos o leña. Los métodos de combustión incluyen quemadores de aceite y gas, así como alimentadores mecánicos de combustibles sólidos.

1.2. Purga en calderas.

Toda el agua de alimentación a calderas contiene cierta cantidad de impurezas sólidas. Cuando el agua de alimentación se evapora en la misma, el vapor se forma a partir de agua pura, quedando sólidos en la caldera. Como resultado los sólidos (suspendidos y disueltos) se

concentran en el agua en ebullición. Para controlar estos sólidos, el agua de la caldera se purga y se reemplaza por agua de alimentación con un bajo contenido de sólidos.

Básicamente, existen dos tipos de purga en calderas a saber:

- a) Purga intermitente. Consiste en purgar simplemente abriendo una válvula al drenaje, efectuando esta operación en forma periódica. En este tipo de purga, por lo general, se desperdicia toda la energía calorífica que contiene.
- b) Purga continua. Se lleva a efecto eliminando continuamente una pequeña cantidad de salinas de la caldera a un flujo controlado, con el fin de mantener una concentración constante en la caldera.

El uso de la purga continua hace posible obtener un mejor control de la concentración del agua de la caldera, de la que puede obtenerse mediante las purgas intermitentes.

Esta purga se puede pasar a través de un intercambiador de calor y recuperar gran parte de sus unidades caloríficas, tal es el caso del precalentador de aire-agua de purga, evitándose así que se desperdicie la energía térmica de esta corriente residual.

Si la caldera se opera a altas presiones, algo de la purga puede ser flasheada a vapor de baja presión en uno o varios pasos antes de pasarla a través del precalentador de aire (Fig.3).

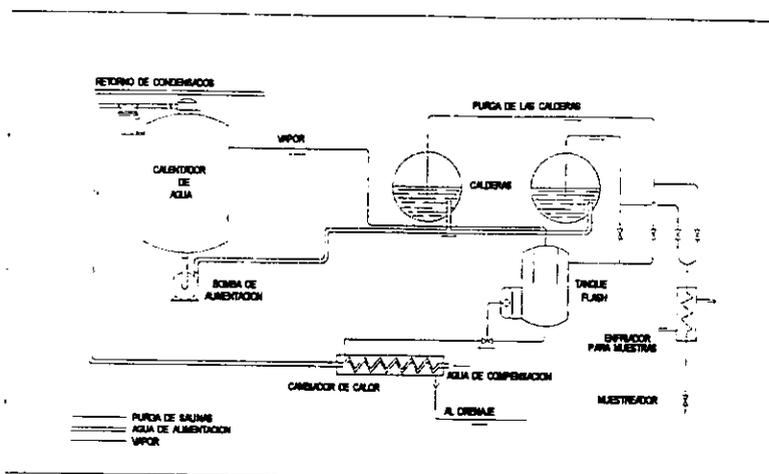


FIGURA 3. Purga continua con flash.

A menudo, la purga se expresa en tantos por ciento del total de evaporación

No hay una regla general que pueda aplicarse con respecto a la frecuencia con que deba purgarse una caldera. Esto depende, en gran medida, de la naturaleza del agua, del tratamiento del agua de alimentación, del diseño de la caldera y de la carga. Por lo tanto, el número de purgas y la frecuencia de éstas debe gobernarse a la concentración del agua de la caldera y, debe estar regulada de tal manera que la concentración de materias en suspensión y sólidos disueltos se conserven muy por abajo del punto en que puede producirse arrastre.

La American Boiler and Affiliated Industries (ABAI) ha establecido los siguientes límites para la concentración del agua en calderas con tambores de vapor:

TABLA 1. Límites permisibles para la concentración de agua en calderas.

Presión del Vapor de Salida.	Sólidos Totales p.p.m.	Alcalinidad Total p.p.m.	Sólidos Suspendidos p.p.m.	Sílice p.p.m.
0-300	3500	700	300	125
301-450	3000	600	250	90
451-600	2500	500	150	50
601-750	2000	400	100	35
751-900	1500	300	60	20
901-1000	1250	250	40	8
1001-1500	1000	200	20	2.5
1501-2000	750	150	10	1.0
2001-y mayor	500	100	5	0.5

Estos límites están en relación con la presión de operación. Bajo éstos límites la calidad de vapor está garantizada, sin embargo, no garantizan la ausencia de problemas de depósitos o de incrustación.

Todas las calderas están equipadas con algún tipo de tubería para la purga manual. Las tomas están generalmente en las partes inferiores de la caldera, donde se recolectan los lodos.

Las instalaciones de purga continua constan de tubería de distribución perforada, a un mínimo de cuatro pulgadas a bajo de la superficie de desprendimiento de vapor. La tubería de descarga está localizada en el domo de vapor cerca de la descarga de los tubos de generación y, retirada de la entrada de agua de alimentación.

1.3.3. Precalentadores de aire.

Un precalentador de aire es un aparato de transferencia de calor, a través del cual el aire de combustión es pasado y calentado por un

medio de alta temperatura tal como los productos de la combustión, vapor u otro fluido.

Se le utiliza para la recuperación de calor de los gases de escape en una unidad generadora de vapor; ocasionalmente se le utiliza para extraer calor de alguna otra fuente. Este calor recuperado, se agrega al aire requerido para la combustión o, se usa para secado u otros procesos.

El precalentador de aire se compone, en lo esencial, de una superficie de intercambio de calor instalada en la trayectoria del fluido caliente, entre la caldera y la chimenea, o entre el economizador (sí lo hay) y la chimenea. El aire es calentado al ser empujado a través del calentador por medio de un ventilador de tiro forzado.

Su empleo depende de las condiciones y necesidades de la instalación así como de los factores técnicos y económicos de la planta.

La alta eficiencia y las características óptimas de operación en las plantas generadoras de vapor, se obtienen únicamente por medio de los calentadores de aire.

Una reducción de la temperatura de los gases de escape en 56°C (100°F) elevará la eficiencia general de la planta en un 2.3 a 2.6%. Un precalentamiento de 56°C del aire de la combustión da por resultado un aumento del 2% de la eficiencia. Los ahorros totales de combustible, atribuibles al precalentamiento de aire, fluctúan entre el 5 y el 10%

Los precalentadores de aire ofrecen las siguientes características, altamente deseables:

1. La eficiencia de la combustión mejora, porque ésta es casi completa con menor cantidad de exceso de aire.

2. Acelera la ignición, lo que permite mayor flexibilidad en la carga.
3. Acelera la combustión, por lo que se reduce el tamaño del fogón o en su defecto se crea una mayor liberación de calor para un volumen determinado.
4. Se produce una temperatura más elevada en el fogón, que aumenta el coeficiente de absorción de calor y la producción de vapor.
5. Aumenta la eficiencia general de la caldera, a consecuencia del mejoramiento de la combustión y temperatura de los gases de escape, lo que permite la reducción de la superficie de calefacción de la caldera.
6. La combustión más completa del combustible reduce los periodos de parada de la caldera para su limpieza.

1.3.1. Clasificación.

Los calentadores de aire se pueden clasificar de acuerdo con su principio de operación, de la manera siguiente:

- I. Calentadores recuperativos.
- II. Calentadores regenerativos.

Calentador de aire recuperativo.

En este tipo de calentador el calor procedente de un fluido en movimiento (gases de escape, vapor, etc.) pasa a través de la superficie de intercambio de calor (separación por medio de metal), hacia el aire más frío (también en movimiento); como se muestra en la figura 4.

Es importante hacer notar que el medio de calefacción está completamente separado, en todo momento, del aire que es calentado.

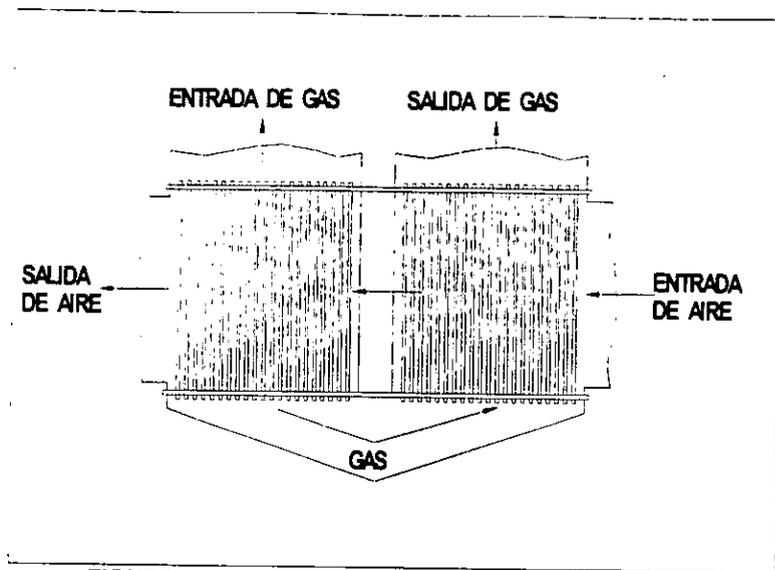


FIGURA 4. Precalentador de aire recuperativo (tubular)

El principio de recuperación implica la transferencia de calor a través de la pared de separación, en donde la parte fría está recuperando continuamente el calor emitido por la parte caliente. La superficie de separación puede estar formada por tubos o placas.

El régimen de flujo se determina por:

1. El diferencial de la temperatura.
2. La conductividad térmica del metal.
3. La conductividad superficial del gas.
4. Las acumulaciones de cenizas y productos de la corrosión.

Dentro de este tipo de calentadores, el precalentador tubular es de uso común. Este equipo está formado por una batería de tubos largos y rectos, de acero, expandidos dentro de espejos (o fijos a dichos espejos) por ambos extremos; y por una caja envolvente, provista de aberturas

de entrada y salida. Si los tubos están en posición vertical, los gases pasan a través o alrededor de los mismos; si los tubos son de construcción horizontal, los gases fluyen únicamente alrededor de los tubos.

La construcción, que por lo general se dispone para el flujo de contracorriente, puede ser de un solo paso o de retornos múltiples (puede tener hasta seis o siete retornos), con mamparas axiales (paralelas a los tubos) o deflectores.

Calentadores de aire regenerativos.

El calentador de aire del tipo regenerativo, es un medio de calefacción indirecta, en el cual una masa adecuada (una estructura que sirve de cuerpo intermedio de almacenamiento de calor), es térmicamente regenerada por el paso de los productos de la combustión calientes (o por cualquier otra fuente de calor), después que ha sido enfriada por la corriente de aire (Fig. 5).

Aunque es expuesto intermitentemente a las mismas superficies de almacenamiento de calor, el aire no entra en contacto directo con el medio de calefacción. El calor de los gases no pasa por medio de una barrera metálica, sino que es más bien absorbido por la masa acumuladora; más tarde es liberado por el aire de combustión que entra. La unidad es altamente eficiente, las temperaturas del metal son uniformes y se eliminan los focos de calor.

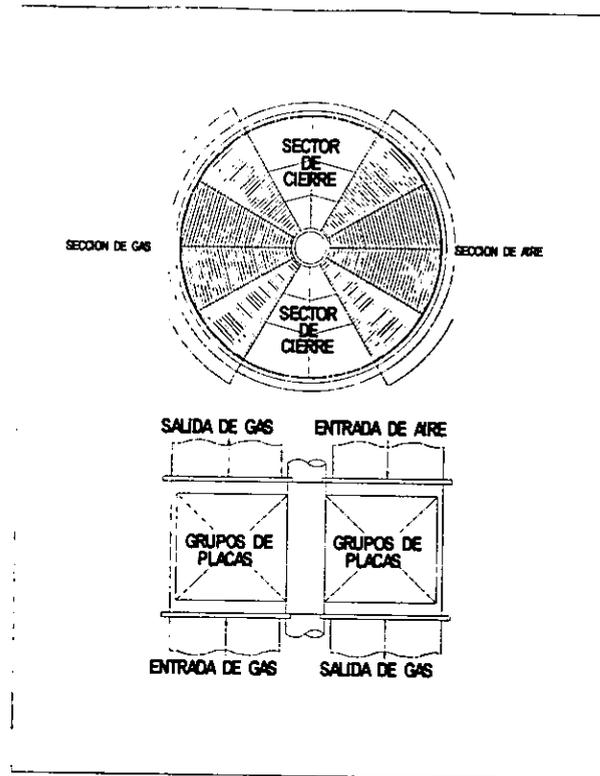


FIGURA 5. Precalentador de aire regenerativo.

1.3.2. Diseño y aplicación.

El coeficiente de transferencia de calor de los gases de escape al aire, puede variar entre 9.72 y 24.4 kcal/h/m² por °C (2 a 5 Btu/h/pie² por °F) de diferencial promedio de temperatura entre el gas y el aire.

Aunque la forma y configuración de los ductos del flujo ejercen influencia sobre el factor de transferencia de calor, la consideración más importante debe dársele a la velocidad. Las pérdidas por fricción del tiro aumentan con el cuadrado de la velocidad de los gases y el aire. En consecuencia, la velocidad y con esto también, el coeficiente de transferencia de calor, están limitados por la pérdida de tiro admisible a través del precalentador de aire.

Con el empleo de un precalentador de aire, se reducen al mínimo las variaciones de la eficiencia que provienen de las fluctuaciones de la carga de la caldera. Un aumento en la carga de la caldera, aumenta a su vez el volumen y la temperatura de los gases de combustión. Esta circunstancia mejora, por su parte, el coeficiente de transferencia de calor a través del calentador de aire.

La superficie del precalentador de aire puede tener una proporción de entre el 80 y el 150% de la superficie de calefacción de la caldera, si el precalentador se opera en combinación con un economizador. Sin el economizador, su extensión alcanza hasta el 300%.

La temperatura a la que se puede precalentar el aire para la combustión, varía considerablemente y es afectada por:

1. Las características del combustible.
2. El método de combustión empleado.
3. El equipo de alimentación del combustible.
4. La construcción del fogón.

Algunos tipos de carbón bituminoso tienden a apelmazarse si la temperatura del aire excede de 121°C (250°F); algunos otros permiten temperaturas hasta de 177°C (350°F). La antracita y el cisco de coque se pueden quemar con aire precalentado a 232°C (450°F). Los combustibles que arden en suspensión (carbón pulverizado, aceite, gas, etc.), operan con aire precalentado a una temperatura máxima apropiada de 371°C (700°F). Con algunos tipos de carbón pulverizado, el precalentamiento del aire es mantenido a sólo 149°C (300°F).

Con alimentadores de parrilla de cadena, el precalentamiento del aire queda limitado a una temperatura de 149 a 177°C (300 a 350°F), para que el costo del mantenimiento del alimentador de combustible permanezca bajo.

Los fogones con revestimiento de material refractario, requieren un recubrimiento con refractarios de mayor resistencia que los operados sin precalentamiento de aire.

Con la utilización de acero suave laminado en caliente, o de acero con aleación de cobre, la temperatura de entrada de los gases se mantiene usualmente entre los límites de 454 a 482°C (850 a 900°F), con un máximo hasta 538°C (1000°F). Para temperaturas más altas, se han usado materiales como el fierro colado o aceros de aleación especial.

Un sistema de precalentamiento, que normalmente utiliza la energía residual de los gases producto de la combustión, permite recobrar energía que de otro modo se perdería; además, de producir ganancias económicas importantes derivadas del ahorro de combustible y del aumento de la eficiencia de un equipo de combustión. Aunado esto, a la ventaja de disminuir, en cierta medida, la emisión de contaminantes a la atmósfera.

1.3.3. Cuidado de los precalentadores de aire.

Estos equipos son hechos de acero y deben ser aislados externamente para prevenir pérdidas de calor. La temperatura del aire entrante al precalentador debe ser monitoreada. Si la temperatura se toma demasiado baja, el lado de los gases sudará provocando corrosión cuando el hollín y la humedad se combinan.

Los precalentadores de aire deben ser examinados al menos una vez por año para identificar signos de corrosión.

Si los tubos o placas se corroen, parte del aire se mezclará con los gases de combustión que salen rumbo a la chimenea. Esta pérdida de aire para combustión podría crear una combustión incompleta del combustible y desarrollará humo. Además, el calor podría perderse, ocasionando una baja eficiencia del equipo de combustión.

1.4. ¿Qué es un Precalentador de Aire-Agua de Purga.

Un precalentador de aire-agua de purga es un equipo de transferencia de calor (intercambiador de calor) a través del cual circula el aire de combustión y precalentado, aprovechando la energía calorífica del agua de purga (continua) proveniente de una caldera (corriente residual).

Este equipo puede ser parte integral de un Sistema de Precalentamiento de Aire (SPA) para mejorar la eficiencia de un equipo de combustión, tal como calderas de tubos de agua o calentadores a fuego directo.

La figura 6 muestra un diagrama de un SPA típico. Este sistema utiliza los gases de salida de la combustión para calentar el aire que se introduce a los quemadores.

Básicamente un SPA está integrado por un precalentador de aire primario, que normalmente utiliza vapor como fluido de transferencia de calor; un precalentador de aire-gases; un ventilador de tiro forzado; un ventilador de tiro inducido y ductos para aire y gases.

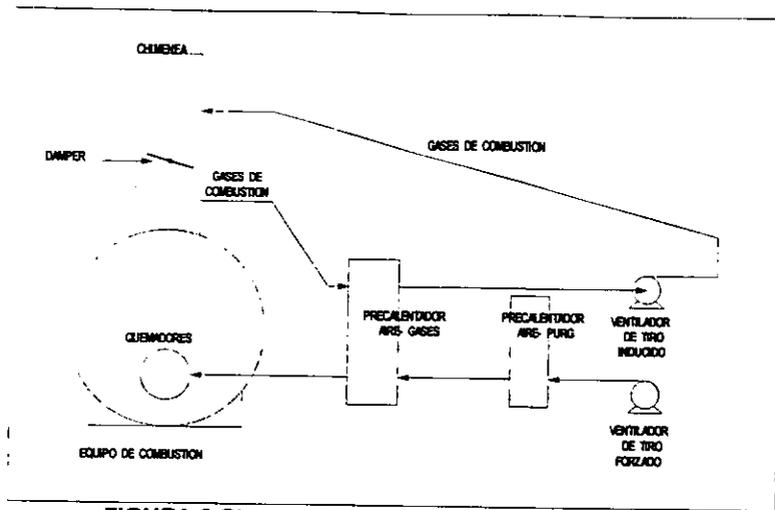


FIGURA 6. Sistema de Precalentamiento de Aire (SPA).

Si se suministrara aire a temperatura ambiente dentro del precalentador de aire-gases, y se alcanza la temperatura de rocío, se puede producir la condensación de componentes ácidos que resultan del gran contenido de azufre que tienen algunos combustibles, por ejemplo el combustóleo. Esto provocaría serios problemas de corrosión, fatales para el equipo.

Para evitar esto es que se implementa un precalentador de aire primario con el fin de que el aire proveniente de la atmósfera, que entra al precalentador de aire-gases, no tenga una temperatura demasiado baja evitándose así que se llegue al punto de rocío ácido y la reducción de los potenciales problemas de corrosión.

Para calentar el aire atmosférico, en el precalentador primario, es común utilizar una corriente de vapor de agua saturado y de baja presión, hecho que implica el uso de mayores recursos económicos.

Sin embargo, es posible eliminar este consumo adicional de vapor sustituyendo el precalentador de aire-vapor por un precalentador de aire-agua de purga; lo que permitirá el ahorro de un energético valioso (vapor), y por lo tanto un ahorro económico, además del aprovechamiento de la energía de una corriente residual que de otro modo se perdería en el drenaje.

CAPITULO 2.

SELECCIÓN DEL MATERIAL.

En el proceso de diseño mecánico, la selección del material representa la primer etapa en la conformación física del equipo.

La selección de un material para la fabricación de un equipo como el Precalentador de aire-agua de purga, y en general cualquier equipo relacionado con la combustión, involucra los siguientes factores:

- La presión y temperatura de diseño.
- Las condiciones de operación del equipo.
- Los elementos corrosivos presentes.

Para el caso del PAAP, en el que la presión y temperatura no son tan severas, la corrosión provocada por el agua de purga es el parámetro principal para la selección del material.

Desde un punto de vista meramente técnico una solución obvia a los problemas de corrosión es utilizar aleaciones altamente resistentes. Sin embargo, la selección final será un acuerdo entre su eficiencia mecánica y factores económicos.

Debido a su bajo costo, su resistencia mecánica y la facilidad que presentan para manufacturarse, los aceros de bajo carbono se utilizan para fabricar equipos tales como el PAAP.

Existen muchos procedimientos para proteger de la corrosión la superficie de los aceros. Se utilizan con profusión los recubrimientos de cinc, cobre, níquel cobre y cadmio; además de otros revestimientos orgánicos como pinturas y lacas.

En la especificación de un material, se requiere de tres etapas:

- 1) Listar los requerimientos.
- 2) Seleccionar y evaluar diferentes materiales.
- 3) Elegir el material que proporcione la solución más económica.

La tabla 2 muestra los requerimientos típicos y algunos de los procedimientos involucrados en el proceso de selección.^[2]

En el proceso de selección del material, es necesario establecer un consenso entre las consideraciones de diseño y los procesos de manufactura.

TABLA 2. Requerimientos y consideraciones para la selección de un material.

Requerimientos	Consideraciones para la selección.
Propiedades (mecánicas, corrosión).	Vida total esperada.
Facilidad de fabricación.	Vida de servicio estimada.
Compatibilidad con equipo existente.	Confiability.
Mantenimiento.	Costos del material.
Especificaciones que lo describen.	Costos de fabricación.
Disponibilidad en el mercado.	Costos de mantenimiento.
	Costos de inspección.

Esto es, la parte del diseño se interesa en las propiedades porque debe conocer las resistencias de los materiales antes de que pueda calcular los tamaños y formas requeridos para soportar las cargas; las propiedades químicas, para afrontar las condiciones corrosivas y otras propiedades para satisfacer los demás requisitos funcionales. Sin

embargo, las propiedades que afectan los procesos, pueden ser de mayor interés durante el proceso de manufactura.

Muchos problemas de manufactura se originan en una selección del material basada sólo en los requisitos funcionales, sin considerar cual es el más adecuado para el proceso de manufactura requerido.

A continuación se describen, brevemente, los materiales de uso más común en el diseño de equipos de combustión.

Aceros al carbono.

El acero es una aleación de hierro y carbono, que generalmente contiene ciertas cantidades de manganeso y otros elementos.

La variedad de aplicaciones del acero para fines de Ingeniería se debe al amplio intervalo de propiedades físicas que se puede obtener por cambios en el contenido de carbono y en el tratamiento térmico.

Los aceros al carbono son aleaciones principalmente de hierro, carbono y silicio, es adecuado donde la corrosión debida a la oxidación, ácidos u otros compuestos químicos es relativamente moderada.

Los aceros al carbono pueden dividirse de manera general en tres grupos:

1. De bajo contenido de carbono, 0.05 a 0.25% de carbono, utilizable donde solamente se requiere una resistencia moderada unida a una plasticidad considerable.

Usualmente, los aceros de bajo carbono se seleccionan, no por su resistencia a la corrosión sino, por propiedades tales como resistencia mecánica, facilidad de fabricación y costo.

2. Aceros para maquinaria, 0.30 a 0.55% de carbono, los cuales pueden tratarse térmicamente para desarrollar alta resistencia.
3. Aceros de alto carbono, con 0.60 a 1.30%. Se emplean para la fabricación de todo elemento que deba ser resistente al desgaste.

Las composiciones químicas y las propiedades mecánicas y físicas se encuentran compiladas en las especificaciones adoptadas por la American Society for Testing and Materials (ASTM).

La selección del material implica la mención del estándar ASTM que cubre dicho material.

Aceros Inoxidables.

Los aceros inoxidables son aceros que contienen de 10 a 30% de cromo y, además pueden tener níquel, molibdeno y adiciones de cobre para incrementar la resistencia a la corrosión.

Estos aceros poseen alta resistencia a la corrosión y a la oxidación a temperaturas elevadas y mantienen una resistencia mecánica considerable a esas temperaturas. Sin embargo debe tenerse en cuenta que son materiales con un alto costo y su manufactura en ocasiones se torna complicada. Por lo tanto sólo serán aplicables en la medida en que su desempeño contra un ambiente corrosivo específico justifique su costo.

Existe una gran variedad de estas aleaciones. Se clasifican en tres grupos:

1. Aceros inoxidable austeníticos.
2. Aceros inoxidable martensíticos.
3. Aceros inoxidable ferríticos.

Aceros Inoxidables Austeníticos.

Contienen níquel y cobre. La composición más común es 18 Cr y 8Ni (conocida como 18-8) y se han desarrollado muchas modificaciones para aplicaciones especiales. No pueden templarse, pero pueden endurecerse por medio de trabajo en frío. Sin embargo, en esta forma se obtienen excelentes propiedades en los grados con bajo contenido de níquel. Resisten a muchos ácidos, entre los cuales está el ácido nítrico frío o caliente. Poseen excelente tenacidad a temperaturas tan bajas como la del helio líquido (-269°C o -452°F) y son útiles para piezas sometidas para esfuerzos severos a temperaturas elevadas, 1095°C (2000°F) sin que haya incrustaciones excesivas.

Encuentran excelentes aplicaciones en lugares en que hay que soldar y resulta impráctico el recocido o revenido posterior.

Aceros Inoxidables martensíticos.

Estos tipos de aceros son aleaciones templables con contenido hasta de 18% de cromo. Se emplean en elementos para funcionamiento a altas temperaturas, válvulas de bola y sus asientos, y aplicaciones similares. Muestran notable resistencia a los ácidos orgánicos y amoniaco.

Aceros Inoxidables ferríticos.

Son aleaciones de bajo contenido de carbono que no se tiemplan y con contenido de hasta de 27% de cromo. Poseen gran ductilidad, facilidad para trabajarse en frío o en caliente, así como excelente resistencia a la corrosión, y suelen tener un costo bajo. Para resistir condiciones de

oxidación a altas temperaturas, se aumenta el contenido de Cr a entre 25 y 30%. Estas aleaciones son útiles para toda clase de piezas para hornos que no estén sometidas a esfuerzos intensos.

Aceros Especiales.

Estos aceros son representados principalmente por aleaciones Incoloy 800 y similares (20%Cr y 32%Ni), tienen excelente resistencia mecánica hasta 980°C (1800°F) y son resistentes a la oxidación y a la carbonización. Este material es usado para tubos de hornos y sobre calentadores de vapor, y para salidas de múltiples en calentadores de reformación.

2.2. Corrosión en el PAAP.

En términos técnicos simplificados, la corrosión se define como el deterioro o destrucción de un material debida a la reacción con el medio ambiente, y representa la diferencia entre la operación libre de problemas y otra con gastos de operación elevados.

La corrosión es de naturaleza electroquímica y frecuentemente un proceso muy complejo. La corrosión puede tener lugar uniformemente sobre la superficie, o bien; estar localizada en una porción específica del material.

Para efectos prácticos, es casi imposible eliminar la corrosión y la función primordial de la ingeniería en éste campo radica más en su control que en su eliminación siendo necesario tomar en cuenta el fenómeno corrosivo desde el diseño del equipo y no después de ponerlo en operación.

Existen muchas razones por las cuales el control de la corrosión se vuelve un factor decisivo en el diseño de cualquier equipo dentro de una instalación industrial.

Dentro de los aspectos económicos se tienen:

- a) La reposición del equipo afectado.
- b) El sobrediseño del equipo para soportar la corrosión.
- c) Mantenimiento preventivo para controlar los efectos de la corrosión.
- d) Paros de producción debidos a fallas por corrosión.
- e) Contaminación de los productos de proceso.
- f) Pérdida de eficiencia.
- g) Daño del equipo adyacente por fallas debidas a corrosión.

Afortunadamente, en la actualidad, se cuenta con un gran número de aleaciones que pueden comportarse satisfactoriamente en medios específicos; además, existen métodos de inhibición que minimizan el problema.

En los sistemas de vapor, la corrosión en general no es un modo raro de falla, ya que se emplea un tratamiento del agua para prevenirla. No obstante, ciertos tipos de corrosión pueden causar serios problemas.

La corrosión por agujeros (pitting) y la corrosión en hendiduras son los tipos principales que se presentan en los economizadores. Ambos tipos proceden del mismo mecanismo: corrosión galvánica.

Corrosión por picadura.

Este tipo de corrosión es la formación de picaduras en una parte de la superficie relativamente libre de corrosión. Estas perforaciones pueden tener varias formas; la forma de la picadura es responsable de su

continuo crecimiento. Una picadura puede considerarse como una grieta formada por sí misma.

La corrosión por picaduras, usualmente, es un proceso lento el cual tarda varios meses o años para volverse evidente, sin embargo puede causar fallas repentinas.

El pequeño tamaño de la picadura y la reducida cantidad de metal que se disuelve para formarlas hacen difícil la detección de éstas en las primeras etapas del ataque.

Mantener superficies limpias y la selección de materiales que se saben resistentes a picaduras, son usualmente las formas más seguras de evitar el problema.

Corrosión en hendiduras o grietas.

Un ambiente agresivo puede causar y desarrollar corrosión local en una grieta. Las grietas comúnmente existen partes de equipos tales como: juntas, empalmes, tornillos, remaches, etc. Estos defectos son creados, también, por depósitos de suciedad, productos de corrosión, rasguños en las capas de pintura, entre otros.

Como en todos los tipos de corrosión localizada, la corrosión en hendiduras no se desarrolla de la misma manera en todas las aleaciones. Algunos metales son más susceptibles a ésta que otros: por ejemplo, los aceros inoxidable y el titanio, que dependen de la formación de una capa de óxido para desarrollar su resistencia a la corrosión. Sin embargo, estos materiales pueden alearse para mejorar su resistencia; y junto con el diseño para minimizar las rajaduras y los programas de mantenimiento para mantener limpias las superficies del equipo, pueden minimizar el problema.

Corrosión erosión.

Cuando el movimiento de un elemento abrasivo sobre la superficie de un metal incrementa su grado de ataque, debido al desgaste mecánico y a la corrosión, se produce la corrosión por erosión.

La importancia relativa del desgaste mecánico y la corrosión es, frecuentemente, difícil de evaluar y varía de una situación a otra. La agresividad de la erosión se atribuye a la remoción de las capas protectoras que forman las aleaciones para resistir el ataque del medio corrosivo.

La corrosión erosión generalmente se desarrolla debido a condiciones de alta velocidad, turbulencia e impactos, entre otros factores. Este tipo de corrosión se presenta en bombas, agitadores y particularmente en curvas y codos de tubería. Esto puede evitarse por cambios en el diseño o por la selección de un material más resistente.

Dentro del PAAP este tipo de corrosión se controla limitando el diseño del serpentín a los criterios de presión y velocidad ya establecidos (Anexo A).

Básicamente, el precalentador de aire-agua de purga es un intercambiador de calor en el cual se manejan dos fluidos: por el lado carcasa aire atmosférico, que de ningún modo es agresivo para el material; por otro lado, en el interior de los tubos, fluirá agua de purga proveniente de una caldera. El agua puede ser un agente muy corrosivo para los tubos.

Toda el agua de alimentación a calderas contiene cierta cantidad de impurezas sólidas. Cuando al agua de alimentación se evapora dentro de la caldera, el vapor se forma a partir de agua pura, quedando sólidos

en la caldera. Como resultado, los sólidos (suspendidos o disueltos) se concentran en el agua en ebullición. Para controlar estos sólidos el agua de la caldera se purga y se reemplaza por agua de alimentación con un bajo contenido de sólidos. Por lo tanto, el agua de purga contiene una cantidad considerable de sólidos, que hacen de ésta un agente corrosivo para los tubos del serpentín del PAAP.

El agua por sí misma es un elemento corrosivo para el acero, material normalmente utilizado en este tipo de equipos.

Los llamados gases no condensables son gases que no condensan a la temperatura normal encontrada en el agua cruda, son agentes corrosivos que invariablemente son arrastrados por el agua. El más objetable y peligroso de esos gases es el oxígeno disuelto en el agua y, en segundo lugar, el bióxido de carbono.

Las consecuencias del oxígeno disuelto en un recipiente cerrado son que ataca al hierro formando hidróxido férrico. Esta corrosión se presenta como ampollas en el material y dependiendo del tiempo que el oxígeno ataque al material, puede llegar a perforarlo.

El bióxido de carbono corroe el material y muy especialmente en presencia de oxígeno disuelto. EL CO_2 combinado con el agua, forma ácido carbónico, el cual es un agente de corrosión para ciertos materiales féreos, incluso para aleaciones de níquel y aleaciones de cobre.

Sedimentos.

Otro problema que se presentan en el PAAP es la depositación, causada por la considerable cantidad de sólidos presentes en el agua de purga.

Se denomina depositación a la acumulación de material en la superficie de los tubos, hecho que puede causar restricciones de circulación y disminución en la transferencia de calor entre los fluidos.

Muchos sólidos, solubles en el agua de alimentación, se precipitan en el agua de la caldera; esto ocurre por una o ambas razones: (1) cambio en la química del agua cuando pasa de las condiciones de agua de alimentación a agua de caldera y (2) debido a las características retrogradadas de solubilidad de algunas sales.

Las sales que disminuyen su solubilidad de acuerdo a un incremento de la temperatura se dice que tienen una solubilidad retrograda. La forma en que se precipitan se llama incrustación.

La solución más obvia a todos estos problemas es la utilización de aleaciones muy resistentes a la corrosión; sin embargo, las limitaciones de tipo económico ocupan un lugar preponderante en la toma de esta decisión.

CAPITULO 3.

DISEÑO MECANICO DE LOS ELEMENTOS QUE COMPONEN UN PRECALENTADOR DE AIRE-AGUA DE PURGA (PAAP).

La configuración de cualquier equipo, debe ser detallada completamente, por lo que en el presente capítulo se describirán las características y procedimientos de diseño para cada uno de los elementos mecánicos que conforman al PAAP.

En el proceso de diseño de un equipo como este se involucran varias etapas. Así, una vez que se han identificado los alcances y necesidades del equipo se desarrolla el diseño termohidráulico y se lleva a cabo un predimensionamiento basándose en criterios de diseño ya establecidos (ANEXO A). Esta información se reúne en la hoja de datos del equipo.

Una vez que se cuenta con la hoja de datos del equipo se pasa a la parte del diseño mecánico para elaborar y conjuntar todos los elementos mecánicos necesarios, incluyendo la selección de materiales y procesos de fabricación, para que el equipo cumpla con la función para la cual fue concebido. Toda esta información se plasma en los planos finales, que describen al equipo.

3.1 El serpentín de tubos.

El serpentín es la parte fundamental del equipo; en el se realiza el intercambio térmico entre flujos. La configuración de este es fundamental para alcanzar las temperaturas especificadas por lo que el espaciamiento entre tubos, selección de superficies extendidas y materiales son diseñados y seleccionados en base a cálculos y especificaciones internacionales para garantizar el óptimo funcionamiento del equipo.

EL serpentín consiste en un banco de tubos conectados en serie por codos de retorno (180°) tipo "U", o bien por cabezales tipo tapón.

Los tubos pueden ser lisos o con superficies extendidas, dependiendo de las condiciones de transferencia de calor deseables en el precalentador.

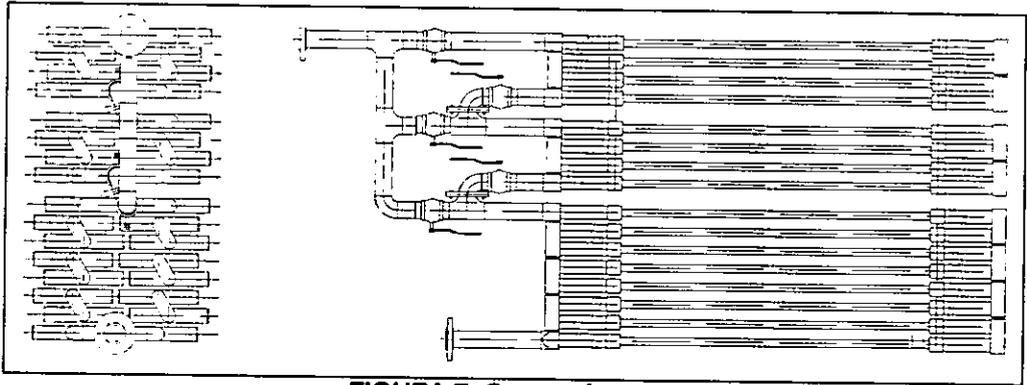


FIGURA 7. Serpentín de tubos.

Los tubos lisos tienen dimensiones estandarizadas y comúnmente se encuentran en el mercado.

Las superficies extendidas pueden ser de tres tipos: Aletas dentelladas, aletas sólidas o birladas.

TABLA 3. Material para superficies extendidas.

MATERIAL DEL PERNO	MAXIMA TEMPERATURA		MATERIAL DE LA ALETA	MAXIMA TEMPERATURA	
	°F	°C		°F	°C
ACERO AL CARBONO	950	510	ACERO AL CARBONO	850	454
2 1/2 Cr—1 Mo, 5 Cr—1/2 Mo	1100	593	—	—	—
11-13 Cr	1200	649	11-13 Cr	1100	953
18 Cr—8 Ni ACERO INOXIDABLE	1500	815	18 Cr—8 Ni ACERO INOXIDABLE	1500	815
25 Cr—20 Ni ACERO INOXIDABLE	1800	982	25 Cr—20 Ni ACERO INOXIDABLE	1800	982

El material seleccionado para superficies extendidas estará determinado por el valor de la temperatura máxima del metal, de acuerdo con la tabla 3. Normalmente el material de éstas es el mismo que el del tubo, y sus dimensiones se muestran en la tabla 4.

TABLA 4. Dimensiones de superficies extendidas.

COMBUSTIBLE	PERNOS				ALETAS					
	DIÁMETRO MINIMO		ALTURA MAXIMA		ESPESOR MINIMO NORMAL		ALTURA MAXIMA		DENSIDAD MAXIMA	
	PLG	MM	PLG	MM	PLG	MM	PLG	MM	P/PLG	P/MM
GAS	1/2	12.7	1	25.4	0.05	1.3	1	25.4	5	197
COMBUSTOLEO	1/2	12.7	1	25.4	0.10	2.5	3/4	19.1	3	118

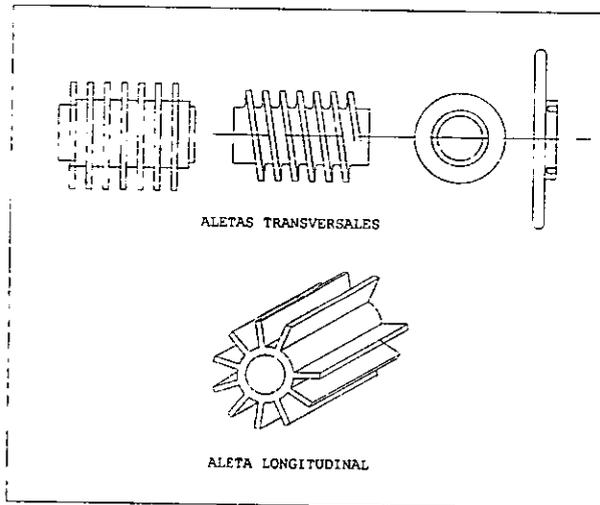


FIGURA 8. Tipos de aletas.

Ahora, se presentarán los procedimientos y criterios de diseño para calcular el espesor de pared de los tubos. Estos procedimientos son apropiados para diseñar en atmósferas corrosivas y no-corrosivas; han sido desarrollados especialmente para el diseño de tubos de calentadores para refinerías, así como para tubos de intercambio

térmico contenidos en una carcaza. Estos procedimientos no son aplicables al diseño de tubos expuestos al ambiente.

Las siguientes consideraciones se basan en los conocimientos que hasta la fecha se tienen sobre el diseño de tubos, y son propuestos por el American Petroleum Institute (API) en su práctica recomendada 530.

Los parámetros usuales de diseño son:

- La presión de diseño.
- La temperatura del fluido.
- La corrosión permisible.
- El material del tubo.

Además, durante el diseño, debe suministrarse la siguiente información:

- a) La vida de diseño del tubo.
- b) Si se aplica el concepto de temperatura equivalente, deben suministrarse las condiciones de operación al principio y al final.
- c) La temperatura permisible, si la hay.
- d) El porcentaje de corrosión permisible.

En caso de que algún (os) de los incisos anteriores no se proporcionen, deberán utilizarse los siguientes parámetros:

- a) Una vida de diseño igual a 100,000 horas.
- b) Una temperatura de diseño del metal basada en la temperatura máxima del metal.
- c) Una temperatura permisible de 25°F (15°C).
- d) La fracción de corrosión.
- e) Los límites del esfuerzo térmico, en el rango elástico.

3.1.1. Diseño.

Existe una diferencia fundamental entre la conducta del acero al carbono en un tubo operando a 575°F (300°C) y un acero cromo-molibdeno operando a 1100°F (600°C). El acero operando a altas temperaturas se estirará o deformará permanentemente, aún a niveles de esfuerzo muy por debajo de su límite elástico.

Cuando la temperatura del tubo es lo suficientemente alta, los efectos del estiramiento serán significativos y, el tubo fallará eventualmente por termofluencia (creep), aún cuando los mecanismos de corrosión u oxidación estén inactivos.

Para aceros que operan a bajas temperaturas, los efectos de termofluencia no existirán. La experiencia indica que en este caso el tubo resistirá a menos que un mecanismo de oxidación o corrosión este activo. Dado que hay una diferencia fundamental entre la conducta de los materiales, a esas dos temperaturas (bajas, altas), existen dos diferentes consideraciones de diseño para tubos a saber: diseño elástico y diseño de ruptura por termofluencia. Para el primero se diseña en el rango elástico, a bajas temperaturas, en donde los esfuerzos admisibles se basan en la resistencia a la cedencia. En el diseño por termofluencia, que en adelante llamaremos diseño por ruptura, se diseña a altas temperaturas en las cuales los esfuerzos permisibles se basan en la resistencia a la ruptura.

La temperatura que separa los rangos elásticos y de ruptura de un tubo no es un simple valor; ésta es un rango de temperaturas que dependen del tipo de aleación con que se fabrique el tubo.

Las consideraciones que gobiernan al rango de diseño también incluyen a la presión de diseño en el rango elástico y de ruptura, la vida de diseño y la corrosión admisible.

En el rango de temperatura cerca o por arriba del punto donde las curvas de esfuerzos se cruzan, ambas ecuaciones de diseño (elástico y de ruptura) deben ser usadas. El valor más grande de t_m (espesor mínimo) debe gobernar al diseño.

Ecuación para esfuerzo.

En ambos rangos, la ecuación de diseño se basa en la ecuación de diámetro medio para esfuerzo en un tubo. En el rango elástico se utilizan, la presión de diseño elástico (P_e) y el esfuerzo permisible elástico (S_e). Por otro lado en el rango de termofluencia se utilizan la presión de diseño y el esfuerzo permisible, en la zona de ruptura, (P_r) y (S_r) respectivamente.

La ecuación de diámetro medio proporciona una buena estimación de la presión que producirá cedencia a través de la pared del tubo, cuando se trate de tubos de pared delgada (tubos con una relación espesor/diámetro exterior, menor de 0.15). Esta ecuación también proporciona una buena relación entre la ruptura por termofluencia de un tubo presurizado y un objeto de prueba uniaxial. Es por lo tanto una ecuación para utilizarse en ambos rangos de diseño.

La ecuación de diámetro medio para esfuerzo se define como:

$$S = \frac{P}{2} \left(\frac{D_o}{t} - 1 \right) = \frac{P}{2} \left(\frac{D_i}{t} + 1 \right) \quad (1)$$

donde:

S = Esfuerzo, lb/plg² (Mpa)

P = Presión, lb/plg² (Mpa)

D_o = Diámetro exterior, plg (mm)

D_i = Diámetro interior, plg. (mm)

t = Espesor, plg. (mm)

Diseño elástico (bajas temperaturas).

El diseño elástico se basa en la protección de la falla por estallamiento cuando la presión está a su máximo, cerca del final de la vida de diseño después de que la corrosión permisible se ha agotado. Con el diseño elástico t_s (espesor de esfuerzo) y t_m se calculan como sigue:

$$t_s = \frac{P_e D_o}{2S_e + p_e} \quad \circ \quad t_s = \frac{P_e D_i}{2S_e - p_e} \quad (2)$$

$$t_m = t_s + CA \quad (3)$$

donde:

- S_e = Esfuerzo elástico permisible, a la temperatura de diseño del metal, lb/plg² (MPa).
- CA = corrosión permisible, plg (mm).
- t_s = Espesor de esfuerzo, plg (mm).
- t_m = Espesor mínimo plg (mm).

Diseño de ruptura (altas temperaturas).

Este diseño se basa en la prevención de la falla por termofluencia durante la vida de diseño. Con el diseño de ruptura, t_s y t_m se calculan como sigue:

$$t_s = \frac{P_r D_o}{2S_r + p_r} \quad \circ \quad t_s = \frac{P_r D_i}{2S_r - p_r} \quad (4)$$

$$t_m = t_s + fCA \quad (5)$$

donde:

- S_r = Esfuerzo de ruptura permisible a la temperatura de diseño del metal y a la vida de diseño lb/plg^2 (MPa).
- f = Porcentaje de corrosión. Si se requiere un diseño conservador puede elegirse $f = 1$.
- $B = CA/t_s$.
- n = exponente de ruptura a la temperatura de diseño del metal.

Rango de temperatura intermedio.

A temperaturas cercanas o por arriba del punto donde se cruzan las curvas de S_e y S_r , cualquier consideración, ya sea elástica o de ruptura, gobernará el diseño. Por lo tanto, en este rango de temperaturas, ambos diseños deberán ser aplicados; y el valor t_m más grande será el apropiado.

Espesor mínimo y promedio.

El espesor mínimo se calcula por (3) y (5). Los tubos se adquieren a este espesor mínimo y tendrán un espesor promedio que es más grande. La tolerancia del espesor se señala en cada especificación ASTM.

En la mayoría de las especificaciones ASTM la tolerancia sobre los espesores mínimos es $-0, +28\%$, para tubos acabados en caliente y $-0, +22\%$ para tubos de materiales acabados en frío. Esto es equivalente a tolerancias para los espesores promedios de $\pm 12.3\%$ y $\pm 9.9\%$, respectivamente. En ocasiones, algunas especificaciones ASTM requieren que el espesor mínimo sea más grande de 0.875 veces el espesor promedio, el cual es equivalente a una tolerancia sobre el espesor promedio de $\pm 12.5\%$.

La tolerancia usada para relacionar el espesor de pared mínimo y promedio deberá ser la tolerancia tomada de las especificaciones ASTM que corresponda a los tubos que se comprarán.

Esfuerzos permisibles.

La práctica recomendada 530 del API proporciona gráficas de los esfuerzos permisibles para una gran cantidad de aleaciones de tubos. Estas gráficas muestran los esfuerzos permisibles elástico y de ruptura. En el apéndice B se muestran las gráficas correspondientes a los aceros de bajo y medio contenido de carbono.

Para los tubos del serpentín en el prototipo, los parámetros de diseño se muestran en la tabla 5. Así, de la ecuación (2) se tiene:

$$t_s = \frac{56.88(1.050)}{2(20 \times 10^3) + 56.88}$$

$$t_s = \frac{59.72}{40056.88} = 0.0015 \text{ plg}$$

Por lo tanto, de (3):

$$t_m = 0.0015 + 0.094$$

$$t_m = 0.095 \text{ plg.}$$

Ya que, se debe seleccionar un espesor de carácter comercial un tubo cédula 40 con un espesor de 0.113 plg, será la elección idónea para este serpentín.

**TABLA 5 Parámetros de diseño del serpentín.
CONDICIONES PARA LOS TUBOS DEL SERPENTIN.**

MATERIAL	ACERO ASTM A106 Gr-B
DIAMETRO NOMINAL, plg.	0.750
DIAMETRO EXTERIOR, plg.	1.050
TEMPERATURA °C	67
PRESION, psi.	56.88
ESFUERZO PERMISIBLE, Ksi.	20
CORROSION ADMISIBLE, plg.	0.094

3.2 Diseño de espejos.

Se llama espejo a una placa, provista de perforaciones, en la cual se apoyan los extremos de los tubos. En el caso del PAAP esta placa es una parte integral de la carcaza (Fig. 9). Debido a esto, pueden utilizarse las mismas ecuaciones que se utilizan para calcular los espesores de las demás placas constituyentes de la carcaza. Dichas ecuaciones, que se muestran más adelante, brindan una buena aproximación del espesor necesario para evitar la flexión de la carcasa debida a la presión reinante en el equipo.

Los agujeros deben tener un diámetro mayor que el diámetro exterior de los tubos del serpentín. Esto permite el movimiento relativo de los tubos durante las expansiones térmicas debidos a las fluctuaciones de la temperatura durante el proceso de transferencia de calor. Sin embargo, esto ocasiona la necesidad de un sello que bloquee esta abertura.

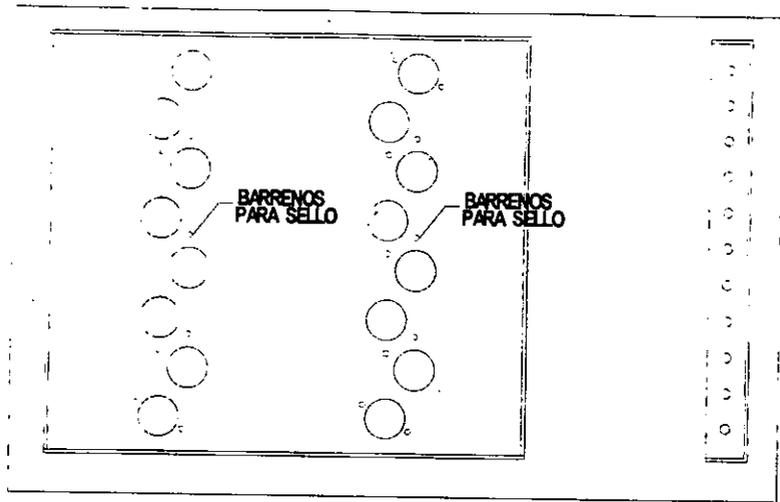


FIGURA 9. Espejo.

La holgura de los barrenos en el espejo debe especificarse de tal manera que el sello se ajuste, herméticamente, entre el contorno exterior de los agujeros y la pared externa del tubo.

En casos donde se presente el fenómeno de golpe de ariete, el sello controla los efectos negativos de los desplazamientos horizontales, que permite el diseño (restricción que se refuerza con los sellos mecánicos).

Todo el peso de los tubos del serpentín, incluyendo el contenido de éstos, es totalmente soportado por los espejos de manera proporcional en cada espejo instalado.

El diseño de los espejos es modular e intercambiable, de manera que el ensamble de los equipos sea más rápido y eficiente. Las piezas del subensamble tienen dobleces, de modo de hacer el equipo lo más

hermético posible y evitar las soldaduras que pudieran presentar problemas a la hora del armado del equipo.

3.3 Diseño de sellos.

En cualquier equipo de combustión la hermeticidad es un factor fundamental para el buen funcionamiento del equipo. La ausencia de fugas de los fluidos de proceso proporcionará un equipo altamente eficiente. Por esto los dispositivos de sello son una parte esencial del PAAP, y más aún; debido a que el equipo es de construcción modular. Por lo tanto se requiere de una gran cantidad de juntas y sellos. Afortunadamente hoy en día existe una gran variedad de materiales, con muy diversas formas, que se adaptan a las necesidades de sellado de cualquier equipo.

3.3.1 Características de las juntas.

La junta, como dispositivo de sello, tiene una función básica: crear un sellado positivo entre dos partes sin movimiento relativo entre ambas. Para obtener un sellado hermético que resista las condiciones de operación del equipo, es necesario tener en cuenta lo siguiente:

- La junta debe ser impermeable al flujo manejado en el sistema.
- La junta debe ser químicamente resistente al fluido a manejar; tanto en su parte interior como exterior, para prevenir un deterioro de sus propiedades físicas al estar en contacto con el fluido.
- La junta no debe contaminar el fluido manejado en el equipo.
- La junta debe ser capaz de resistir, sin dañarse, la presión generada por los tornillos de la brida.
- La junta debe ser adecuadamente deformable, sin requerir grosores excesivos para que la presión aplicada se distribuya uniformemente

sobre las superficies a sellar, compensando las irregularidades normales del acabado de las piezas.

- La junta debe permitir su fácil instalación, remoción y cambio, de tal manera que agilice los trabajos de mantenimiento.

Los materiales principales que se usan para fabricar juntas, también llamados laminados comprimidos, son:

1. Asbesto. Fibra mineral capilar que se aglomera con diferentes elastómeros para hacer una lámina de asbesto comprimido. Estas láminas pueden soportar hasta 900°C y presiones del orden de las 1800 psi.
2. SBR. (Estireno-Butadieno) Elastómero sintético con que se aglomera la mayor parte de láminas de asbesto comprimido.
3. Neopreno. Elastómero con que se aglomeran las láminas de asbesto especiales para sellar gases refrigerantes, y se lamina en forma de hule homogéneo o con trama de tela de algodón.
4. Nitrilo. Elastómero con resistencia a solventes que sirve para aglomerar láminas de asbesto y que también se lamina como hule con caucho para sellar aceites.
5. Fibra Aramid. Fibra sintética que sustituye al asbesto.
6. Fibra de carbono. Fibra para hacer laminas comprimidas para altas temperaturas.
7. Fibra de grafito. Grafito sintético para láminas que resisten hasta 538°C.
8. Teflón. Politetrafluoroetileno resistente a productos químicos.

Así mismo existen cintas para juntas que son muy útiles para cuestiones de sellado.

Estas cintas se pueden fabricar de fibra de vidrio o asbesto; son muy útiles cuando se utilizan como material para sello en presencia de vapor

a alta presión. Sus aplicaciones típicas son en puertas o cubiertas. Pueden soportar el desgaste y la abrasión cuando se usan en puertas que se deben abrir continuamente. Se encuentran disponibles en una gran variedad de anchos y sus espesores varían entre 1.6 y 38.1 mm (1/16 y 1 1/2).

También existen juntas de polímeros moldeables, que son muy prácticos por su facilidad de aplicación y porque se moldea a cualquier forma y rellena raspaduras abolladuras, marcas de torno y piezas de fundición deformadas. Con estos materiales se pueden llenar huecos de hasta 6.4mm (1/4") con dos horas de curado. Después de su curado completo, soportan presiones hidráulicas de hasta 211 Kg/cm² (3000 psi) y temperaturas de hasta 260°C (500°F). No debe usarse en contacto con ácidos concentrados o con sustancias cáusticas concentradas calientes.

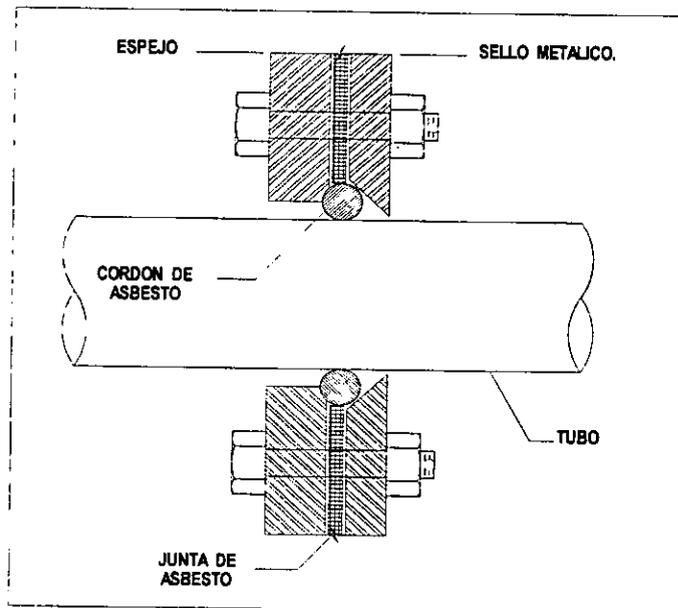


FIGURA 10. Detalle de sello.

La figura 10 muestra el método de sellado entre el tubo y el espejo, que se utilizó en el prototipo.

3.4 Diseño de la carcasa.

La carcasa es la parte del PAAP que soporta las cargas mecánicas del equipo, en cuyo interior esta alojado el haz de tubos y la estructura aislante, y esta formada por placas planas unidas mediante tornillos.

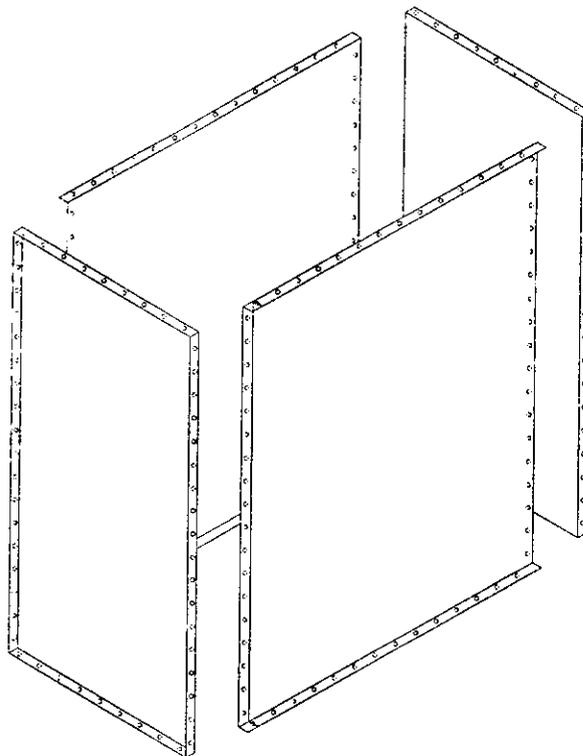


FIGURA 11. Ensamblaje de la carcasa.

El diseño de la carcasa debe incluir consideraciones de las cargas y un cálculo de sus valores. Las cargas pueden ser subdivididas en dos categorías, dependiendo de las causas que la originan y sobre las

variaciones que sufren estas con el tiempo. En la primera categoría se consideran los siguientes tipos:

1. Cargas mecánicas distribuidas; por ejemplo, las ocasionadas por presiones internas o externas
2. Cargas mecánicas concentradas en un área pequeña; por ejemplo, por el mismo peso del equipo aplicado a una columna o un soporte (debe notarse que cuando estas cargas son causadas por las restricciones de expansión térmica de una tubería, esta está limitada por la maleabilidad de la tubería y el punto de anclaje).
3. Cargas térmicas ocasionadas por expansiones diferenciales de la tubería y carcasa, por la expansión térmica del equipo sobre sus soportes y por los gradientes de temperatura a través del espesor de la coraza.

En la segunda categoría se consideran las cargas estáticas o cuasiestáticas que se distinguen de las cargas recurrentes las cuales pueden ocurrir de manera accidental (por ejemplo el choque térmico de una superficie caliente al aplicarse un medio frío). Estas cargas pueden ser mantenidas durante toda la vida útil del equipo, cambiando solo en un pequeño instante, o sufriendo variaciones cíclicas.

Un análisis completo requiere considerar el cálculo de los esfuerzos y deformaciones producidas por la carga. Desgraciadamente, la obtención de las ecuaciones necesarias es muy compleja. Es por esto, que aquí se dan algunos resultados para casos simples que pueden ser aplicados en el diseño de las paredes de la carcasa y las tolvas del PAAP. Es importante aclarar, que debe ser propuesto un mismo espesor de placa para la carcasa del equipo; esto es para facilitar el proceso de fabricación.

a). Placa rectangular, carga uniforme, apoyada simplemente por sus bordes. Las esquinas de una placa rectangular cargada uniformemente tienden a levantarse si la placa está simplemente apoyada en sus bordes. Para un borde simplemente apoyado, se debe evitar el movimiento vertical, pero éste debe tener libertad para rotar. Mediante las ecuaciones empíricas siguientes^[7] se puede tener una buena aproximación de la tensión y deformación.

Esfuerzo máximo,

$$s_x = \frac{0.75qa^2}{h^2 [1.61(a/b)^3 + 1]} \dots\dots\dots(6)$$

$$\text{para } \rightarrow x = \frac{a}{2}, y = 0$$

Deflexión en el centro,

$$w = \frac{0.142qa^4}{Eh^3 [2.21(a/b)^3 + 1]} \dots\dots\dots(7)$$

b). Placa rectangular, carga uniforme, bordes empotrados.

Esfuerzo máximo,

$$s_x = \frac{qa^2}{2h^2 [0.623(a/b)^6 + 1]} \dots\dots\dots(8)$$

$$\text{para } \rightarrow x = \frac{a}{2}, y = 0$$

Deflexión en el centro,

$$w = \frac{0.0824qa^4}{Eh^3 [1.056(a/b)^5 + 1]} \dots\dots\dots(9)$$

NOMENCLATURA

a = Longitud de la placa en el eje x .

b = Longitud de la placa en el eje y .

h = Espesor de la placa.

q = Carga uniforme (presión).

E = Modulo de elasticidad.

s_x = Esfuerzo.

w = Deflexión.

Para el caso del prototipo se analizará la placa lateral de la carcasa, ya que por tener las dimensiones mayores está expuesta a las condiciones más críticas.

Las condiciones son las siguientes (tabla 6):

TABLA 6. Condiciones de diseño para la carcasa y espejos.

CONDICIONES DE DISEÑO.

MATERIAL.	ACERO ASTM A-36
TEMPERATURA, °	63
PRESION, Kg/cm ² .	0.088
ESFUERZO ADMISIBLE, Kg/cm ² .	1188
MODULO DE ELASTICIDAD, Kg/cm ² .	2.05E ⁶
ANCHO, cm.	143.8
LARGO, cm.	60.6

Así, de (8) se tiene:

$$h = \sqrt{\frac{qa^2}{2s_x \left[0.063 \left(\frac{a}{b} \right)^6 + 1 \right]}}$$

$$h = \sqrt{\frac{0.088(143.8)^2}{2(1188) \left[0.063 \left(\frac{143.8}{60.6} \right)^6 + 1 \right]}}$$

$$h = 0.25 \text{ cm.}$$

Lo anterior demuestra que el espesor requerido para soportar la presión existente es muy pequeño; sin embargo, la selección del espesor debe tomar en cuenta consideraciones tales como: la utilización de un espesor comercial y la facilidad de fabricación. Por esto, se seleccionó una placa de 0.48 cm (3/16") de espesor para todo el equipo.

Entonces la deflexión en el centro para esa placa será, de (9):

$$w = \frac{0.0284(0.088)(143.8)^4}{2.05 \times 10^6 (0.48)^3 \left[1.056 \left(\frac{143.8}{60.6} \right)^5 + 1 \right]}$$

$$w = 0.058 \text{ cm.}$$

3.5 Sistemas de aislamiento.

La interacción del equipo con el elemento humano, hace necesario que la parte externa del equipo tenga una temperatura que de ningún modo agrede al personal. Además se debe colocar una barrera para impedir el flujo de calor hacia el medio ambiente, y que proporcione al equipo una apariencia más agradable. Usualmente se coloca una capa, o varias, con un forro exterior que en parte sostiene al aislante y proporciona la apariencia final del equipo.

Temperatura de diseño.

Para la selección del tipo de aislamiento y el cálculo de su espesor, se toma como base la temperatura máxima de operación y la temperatura existente en el exterior, recomendada de la superficie del aislamiento.

La tabla 7 indica las temperaturas exteriores del aislamiento recomendadas, que como máximo se deben obtener con el espesor calculado para el aislante seleccionado.^[3]

Perdida de calor.

El calor se transfiere de un cuerpo a otro por conducción, convección y radiación. Cuando se trata de partes aisladas el calor transferido por conducción es igual al calor transferido por convección más la parte transferida por radiación.

Las ecuaciones básicas en unidades SI son:⁽⁴⁾

para conducción,

$$Q_{cond} = \frac{k}{l}(T_f - T_s) \dots\dots\dots(10)$$

para convección,

$$Q_{conv} = 1.957(T_s - T_a)^{1.25} \sqrt{\frac{196.85 * V + 68.9}{68.9}} \dots\dots\dots(11)$$

y radiación,

$$Q_{rad} = 0.548 * E * \left[\left(\frac{T_s}{55.55} \right)^4 - \left(\frac{T_a}{55.55} \right)^4 \right] \dots\dots\dots(12)$$

Nomenclatura.

Q = Pérdida de calor de la superficie plana (W/m²K).

T_s = Temperatura en la superficie (°K).

T_f = Temperatura del fluido (°K).

T_a = Temperatura ambiente (°K).

V = Velocidad del aire (m/s).

E = Emisividad de la cubierta.

TABLA 7. Temperaturas exteriores recomendadas para aislamiento.^[3]

APLICACIÓN DEL AISLAMIENTO	CON TEMPERATURAS NORMALES DE OPERACION	TEMP. EXTERIOR DEL AISLAMIENTO	
		PARA PROTECCION DEL PERSONAL	PARA LA ESTABILIDAD EN LA OPERACIÓN O CONSERVACION DE CALOR
A. Para estabilizar en la operación.	De 36 °C a 650° C	36 °C	53 °C
B. Para la estabilidad en la operación y conservación del calor.	De 66 °C a 80 °C	40 °C	62 °C
C. Para estabilidad en la operación, conservación de calor y protección del personal.	De 81 °C a 100 °C	40 °C	62 °C
	De 101 °C a 300 °C	58 °C	80 °C
	De 301 °C a 1500 °C	66 °C	88 °C

Soportes para aislamientos.

El equipo que lo requiera, debe contar con el número de soportes necesarios y de la clase apropiada para sujetar el aislamiento; esto se refiere a los anillos y ángulos de refuerzo, clips y pernos que se instalan soldados directamente a la carcasa.

Para aislar el equipo y evitar las perdidas de calor el ambiente se seleccionó lana mineral, por ser lo más comúnmente utilizado en estos casos, y por su gran disponibilidad en el mercado. Para sostener el aislante y dar la apariencia final se utilizó una cubierta de lámina galvanizada. Las condiciones de diseño se muestran en la siguiente tabla (tabla 8):

TABLA 8. Condiciones de diseño para el aislante.

TEMPERATURA AMBIENTE, °K.	298
TEMPERATURA DEL FLUIDO, °K.	336
TEMPERATURA DE LA SUPERFICIE, °K	309
EMISIVIDAD DE LA CUBIERTA.	0.0288
CONDUCTIVIDAD TERMICA, W/m°K.	0.06
VELOCIDAD DEL AIRE, m/s*	0*

***NOTA: SE DISEÑA PARA LA CONDICION MAS CRITICA.**

De (11) se tiene que las pérdidas por convección son:

$$Q_{conv} = 1.957(309 - 298)^{1.25} \sqrt{\frac{196.85(0) + 68.9}{68.9}}$$

$$Q_{conv} = 39.20 \text{ W/m}^2$$

De(12) se obtienen las pérdidas por radiación:

$$Q_{rad} = 0.548(0.288) \left[\left(\frac{309}{55.55} \right)^4 - \left(\frac{298}{55.55} \right)^4 \right]$$

$$Q_{rad} = 16.15 \text{ W/m}^2$$

Por lo tanto, las pérdidas por conducción son:

$$Q_{cond} = Q_{conv} + Q_{rad}$$

$$Q_{cond} = 39.12 + 16.15 = 55.35 \text{ W/m}^2$$

Igualando con (10):

$$Q_{cond} = \frac{k}{l}(T_f - T_s) = 55.35$$

Por lo tanto el espesor del aislante es:

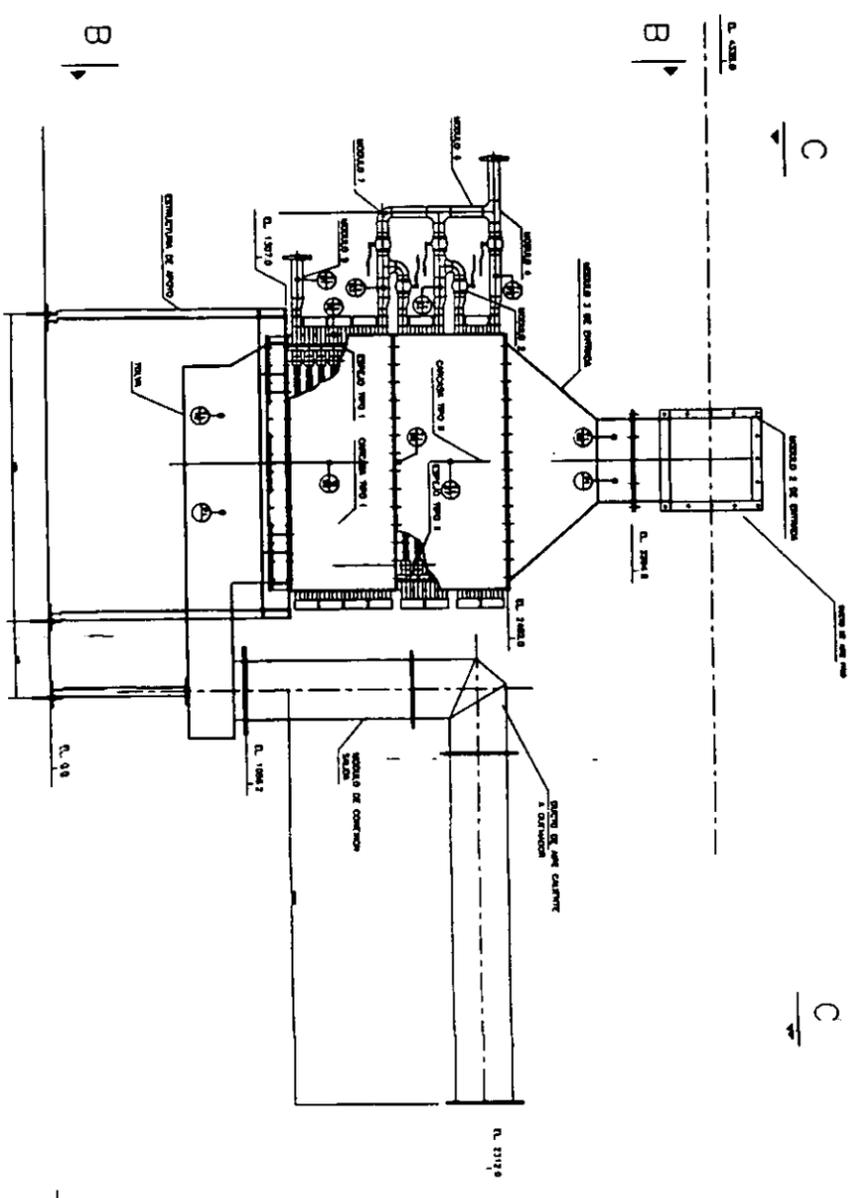
$$l = \frac{k(T_f - T_s)}{55.35}$$

$$l = \frac{0.06(336 - 309)}{55.35}$$

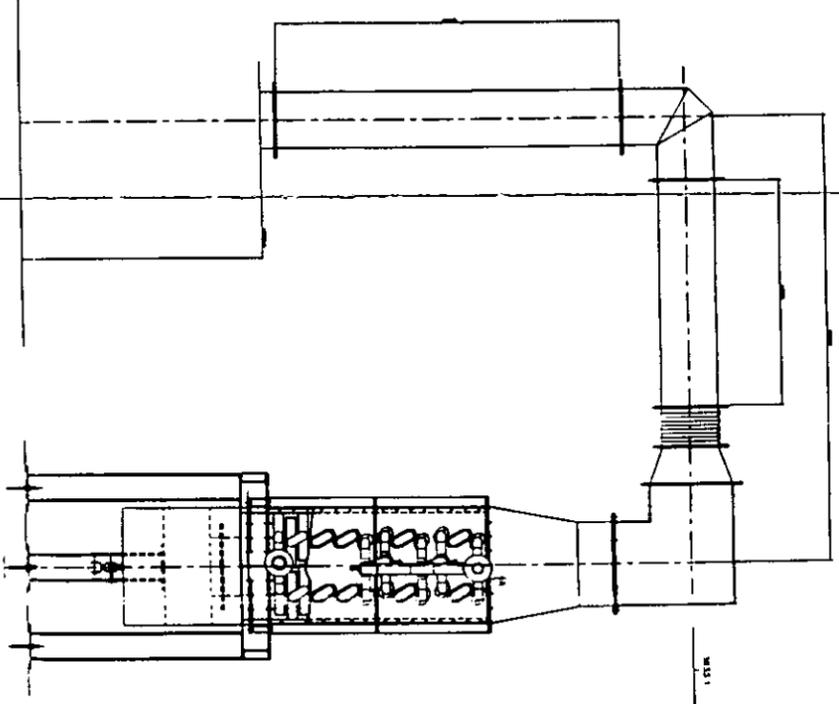
$$l = 0.029 \text{ m} = 1.14 \text{ plg}$$

Normalmente los espesores de aislamiento se manejan en múltiplos de $\frac{1}{2}$ ", por lo que se usará un espesor de $1\frac{1}{2}$ ".

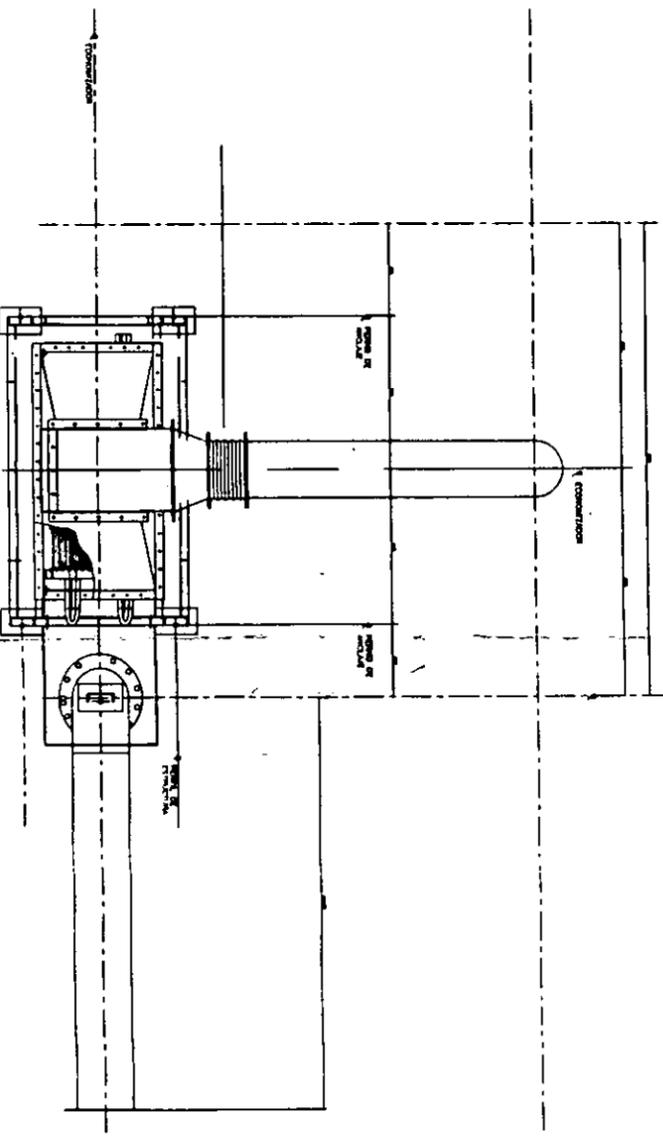
Toda la información y las selecciones hechas por el diseñador deben mostrarse en los planos de ingeniería de detalle finales, que se entregan para cotización y fabricación. Los planos para el prototipo se muestran en las figuras 12 a 16.



VISTA A-A



VISTA B-B



VISTA C-C

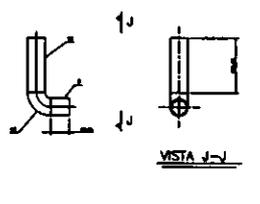
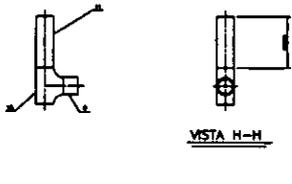
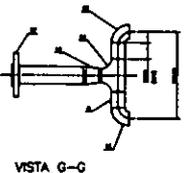
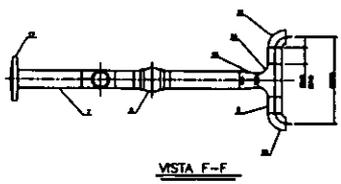
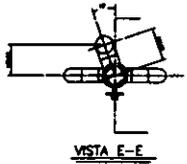
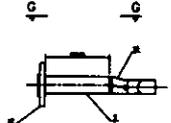
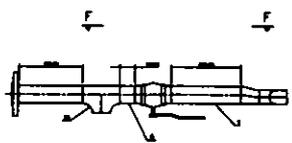
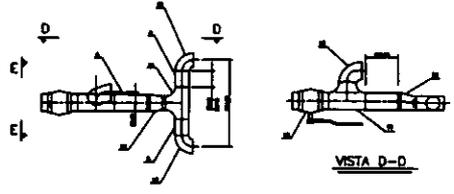
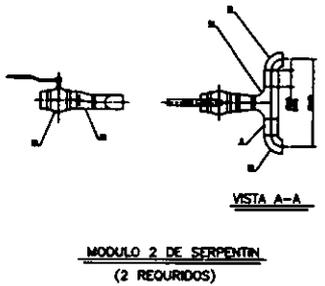
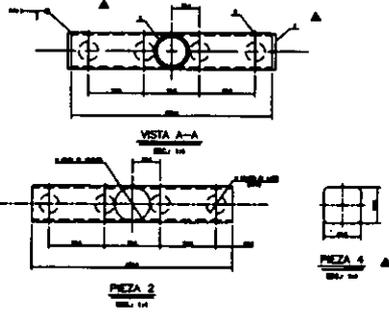
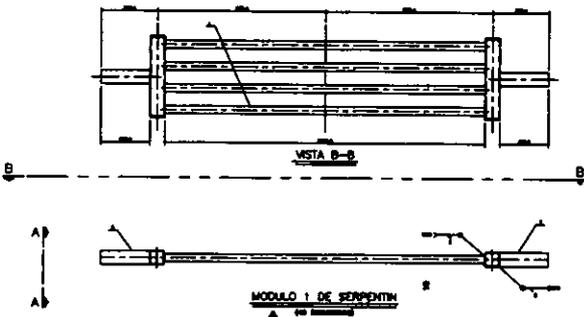
NOTAS GENERALES

1. TODOS LOS AJUSTES DE TUBERIAS DE CONEXION SERAN HECHAS EN CAMPO BASANDOSE EN LOS ESPACIOS DETERMINADOS EN EL LABORATORIO DE PRUEBAS DE LA FÓRMULA
2. LOS CORTES DE TIERRAS SE REALIZARAN 100 mm. MAS CERRIOS QUE LOS INDICADOS EN ESTE PLANO PARA REALIZAR AJUSTES EN CAMPO

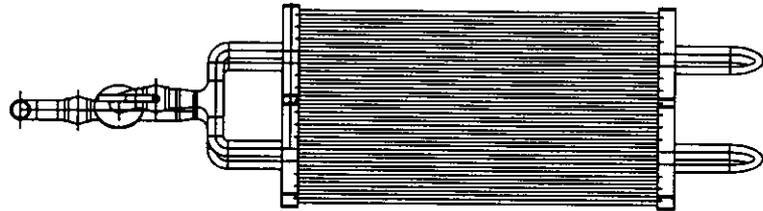
ESC: SIN	FESC-UNAM	OCT 2, 1999	DIB: TAFEM
ACOT: mm	ARREGLO GENERAL		REV: FDC/HR
			FIG No: 12

LISTA DE MATERIALES				
PART	DESCRIPCION	DIMENSION	CANT	MATERIAL
1	TUBO DE 3/4" D.M., CEDULA 40	1108 mm DE LONG.	128	ASTM A 106 Gr B
2	TUBO CUADRADO OR DE 2"x0.125" ESPESOR REF. MARVAL, INC.	275 mm DE LONG.	84	ASTM A 302
3	TUBO DE 1 1/2" D.M., CEDULA 40	170 mm DE LONG.	84	ASTM A 106 Gr. B
4	BOLERA DE 2" x 3/16" ESPESOR	VER PIEZA 5	128	ASTM A 36
5	TUBO DE 1 1/2" D.M., CEDULA 40, SIN COSTURA	111.76 mm DE LONG.	2	ASTM A 106 Gr B
6	IDEM EXCEPTO 2" D.M.	87.15 mm DE LONG.	12	IDEM
7	IDEM	238.76 mm DE LONG.	3	IDEM
8	IDEM	80.8 mm DE LONG.	2	IDEM
9	IDEM	83.8 mm DE LONG.	1	IDEM
10	IDEM	191.44 mm DE LONG.	1	IDEM
11	IDEM	178.74 mm DE LONG.	1	IDEM
12	CODO 90°, DE 1 1/2" D.M., CEDULA 40, RANCO CORTO	—————	12	ASTM A 234 WPB
13	IDEM EXCEPTO 2" D.M.	—————	3	IDEM
14	TEE RECTO DE 1 1/2" D.M., CEDULA 40	—————	8	IDEM
15	IDEM EXCEPTO 2" D.M.	—————	4	IDEM
16	REDUCCION ECCENTRICA DE 2"x1 1/2", CEDULA 40	—————	6	IDEM
17	BRIDA SULFON, R.F., 180°, CEDULA 40	—————	2	ASTM A 106
18	VALVULA ECONOMISER DE 2" D.M. SERIE 400 TIPO 2444STW, MARCA WORCESTER O SIMILAR	—————	5	ACERO AL CARBON
19	RETORNO TIPO "V" DE 180° DE 1 1/2" D.M., CEDULA 40 RANCO CORTO	—————	28	ASTM A 234 WPB

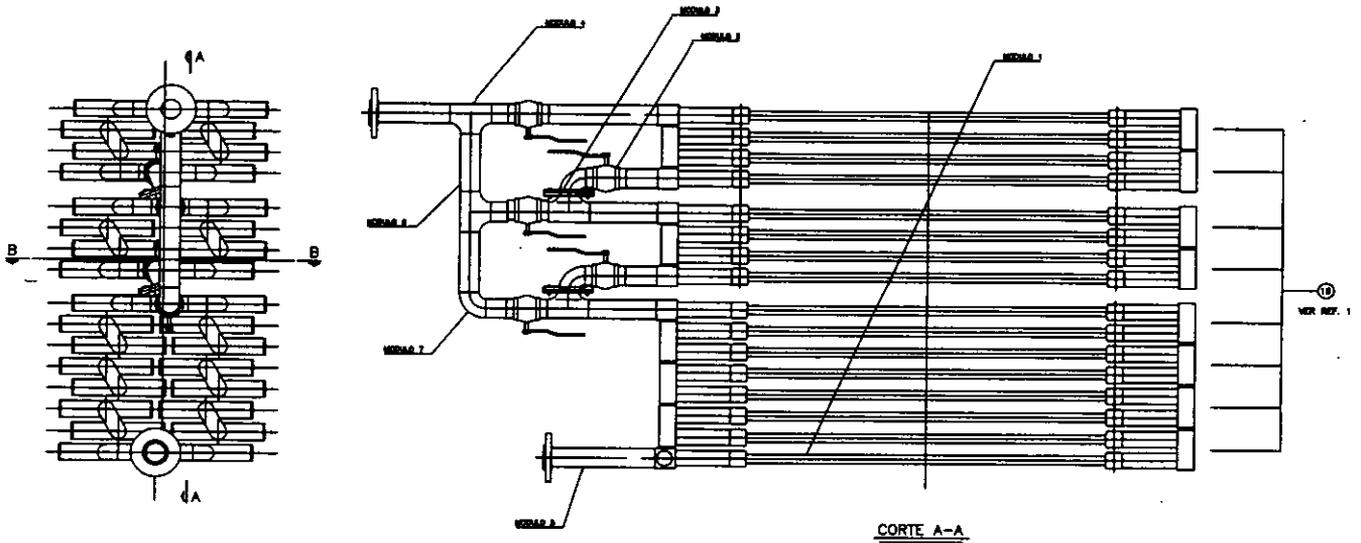
- NOTAS
- SE USARAN UNIDADES SI SIEMPRE.
 - EN CASO DE DUDAS EN LOS TUBOS USADOS DE ACERAR CON LA NOMENCLATURA.
 - LA NOMENCLATURA DE LOS TUBOS USADOS DE ACERAR CON LA NOMENCLATURA.
 - LA NOMENCLATURA DE LOS TUBOS USADOS DE ACERAR CON LA NOMENCLATURA.
 - LA NOMENCLATURA DE LOS TUBOS USADOS DE ACERAR CON LA NOMENCLATURA.
 - LA NOMENCLATURA DE LOS TUBOS USADOS DE ACERAR CON LA NOMENCLATURA.
 - LA NOMENCLATURA DE LOS TUBOS USADOS DE ACERAR CON LA NOMENCLATURA.
 - LA NOMENCLATURA DE LOS TUBOS USADOS DE ACERAR CON LA NOMENCLATURA.



ESC: SIN	FESC-UNAM	OCT 2, 1998	DIB: TAFEM
ACOT: mm	SERPENTIN		REV: FDC/HR
			FIG No: 13



CORTE B-B



CORTE A-A

ESC: SIN

FESC-UNAM

OCT 2, 1998

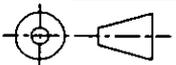
DIB: TAFEM

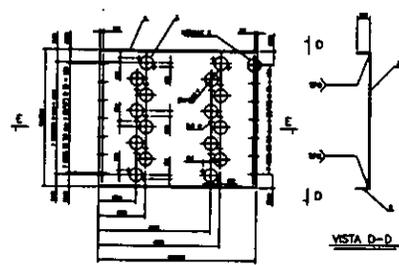
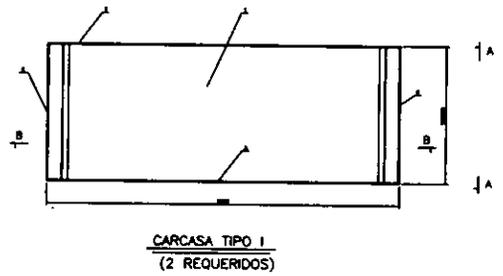
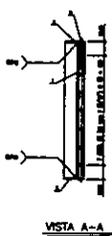
ACOT: mm

SERPENTIN
(ENSAMBLE)

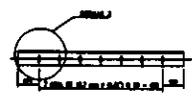
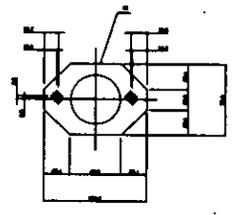
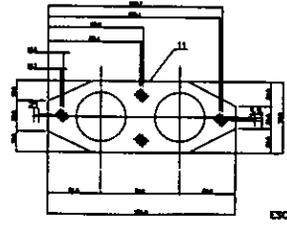
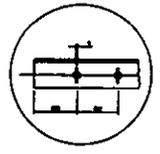
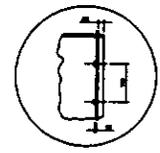
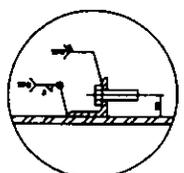
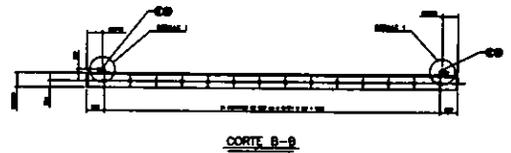
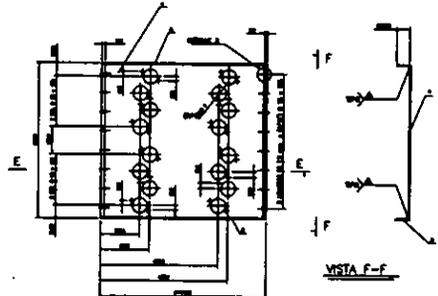
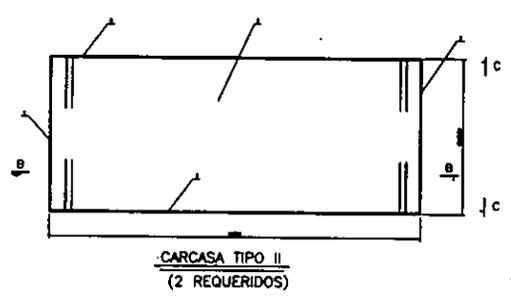
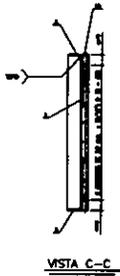
REV:FDC/HR

FIG No: 14





LISTA DE MATERIALES			
NO.	DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD
1	ALUMINIO 6061-T6	KG	1.50
2	ACERO INOXIDABLE 304	KG	0.50
3	BRONCE C-510	KG	0.20
4	BRONCE C-521	KG	0.20
5	BRONCE C-522	KG	0.20
6	BRONCE C-523	KG	0.20
7	BRONCE C-524	KG	0.20
8	BRONCE C-525	KG	0.20
9	BRONCE C-526	KG	0.20
10	BRONCE C-527	KG	0.20
11	BRONCE C-528	KG	0.20
12	BRONCE C-529	KG	0.20
13	BRONCE C-530	KG	0.20
14	BRONCE C-531	KG	0.20
15	BRONCE C-532	KG	0.20
16	BRONCE C-533	KG	0.20
17	BRONCE C-534	KG	0.20
18	BRONCE C-535	KG	0.20
19	BRONCE C-536	KG	0.20
20	BRONCE C-537	KG	0.20
21	BRONCE C-538	KG	0.20
22	BRONCE C-539	KG	0.20
23	BRONCE C-540	KG	0.20
24	BRONCE C-541	KG	0.20
25	BRONCE C-542	KG	0.20
26	BRONCE C-543	KG	0.20
27	BRONCE C-544	KG	0.20
28	BRONCE C-545	KG	0.20
29	BRONCE C-546	KG	0.20
30	BRONCE C-547	KG	0.20
31	BRONCE C-548	KG	0.20
32	BRONCE C-549	KG	0.20
33	BRONCE C-550	KG	0.20
34	BRONCE C-551	KG	0.20
35	BRONCE C-552	KG	0.20
36	BRONCE C-553	KG	0.20
37	BRONCE C-554	KG	0.20
38	BRONCE C-555	KG	0.20
39	BRONCE C-556	KG	0.20
40	BRONCE C-557	KG	0.20
41	BRONCE C-558	KG	0.20
42	BRONCE C-559	KG	0.20
43	BRONCE C-560	KG	0.20
44	BRONCE C-561	KG	0.20
45	BRONCE C-562	KG	0.20
46	BRONCE C-563	KG	0.20
47	BRONCE C-564	KG	0.20
48	BRONCE C-565	KG	0.20
49	BRONCE C-566	KG	0.20
50	BRONCE C-567	KG	0.20
51	BRONCE C-568	KG	0.20
52	BRONCE C-569	KG	0.20
53	BRONCE C-570	KG	0.20
54	BRONCE C-571	KG	0.20
55	BRONCE C-572	KG	0.20
56	BRONCE C-573	KG	0.20
57	BRONCE C-574	KG	0.20
58	BRONCE C-575	KG	0.20
59	BRONCE C-576	KG	0.20
60	BRONCE C-577	KG	0.20
61	BRONCE C-578	KG	0.20
62	BRONCE C-579	KG	0.20
63	BRONCE C-580	KG	0.20
64	BRONCE C-581	KG	0.20
65	BRONCE C-582	KG	0.20
66	BRONCE C-583	KG	0.20
67	BRONCE C-584	KG	0.20
68	BRONCE C-585	KG	0.20
69	BRONCE C-586	KG	0.20
70	BRONCE C-587	KG	0.20
71	BRONCE C-588	KG	0.20
72	BRONCE C-589	KG	0.20
73	BRONCE C-590	KG	0.20
74	BRONCE C-591	KG	0.20
75	BRONCE C-592	KG	0.20
76	BRONCE C-593	KG	0.20
77	BRONCE C-594	KG	0.20
78	BRONCE C-595	KG	0.20
79	BRONCE C-596	KG	0.20
80	BRONCE C-597	KG	0.20
81	BRONCE C-598	KG	0.20
82	BRONCE C-599	KG	0.20
83	BRONCE C-600	KG	0.20



ESC: SIN

FESC-UNAM

OCT 2, 1998

DIB: TAFEM

ACOT: mm

CARCASA Y ESPEJOS

REV: FDC/HR

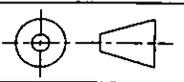
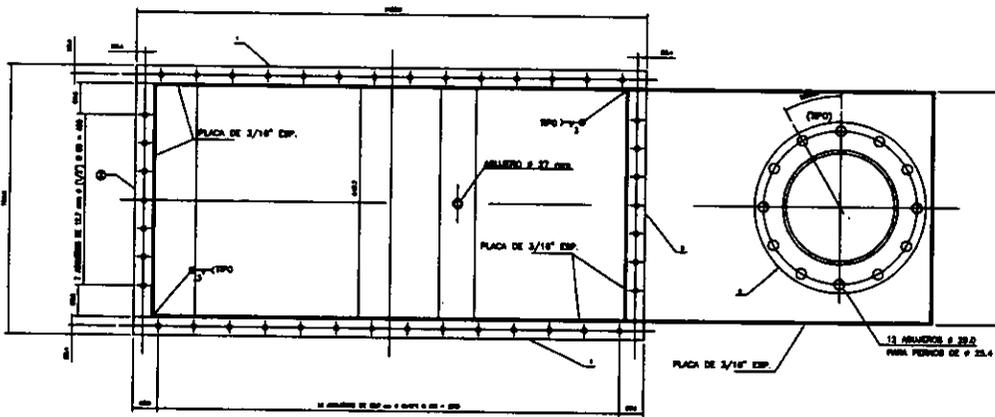


FIG No: 15

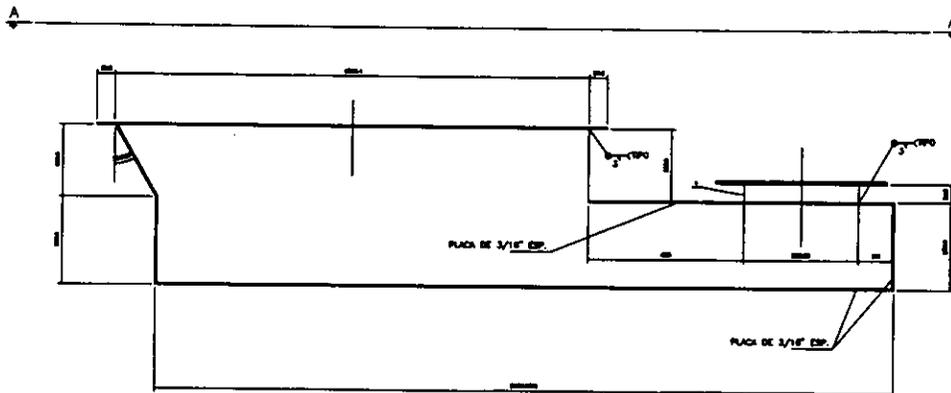
LISTA DE MATERIALES				
PART	DESCRIPCIÓN	DIMENSIÓN	CANT	MATERIAL
1	BOLÓN DE 2" x 3/16" ESPESOR	1438.0 mm DE LONG.	2	ASTM A 36
2	EDM	887.5 mm DE LONG.	2	EDM
3	PLACA DE 1/2" ESPESOR	VER VEDA A-A	1	EDM
4	TUBO DE 1 1/2" D.I.M. CERRALA EXPANSOR, C/C	51.0 mm DE LONG.	1	ASTM A 106 GR. B
5	TUBO DE 3/4" D.I.M. CERRALA 40, SIN COSTURA	EDM	2	EDM
6	EDM	180.0 mm DE LONG.	1	EDM
7	EDM	VER NOTA 1	1	EDM
8	TEL. CERRILLO BUERTO SOLDABLE, 3/4" D.I.M., 2000 #	---	1	ASTM A 324 SPS
9	MALLA COMPUESTA DE 3/4" D.I.M. 180 #, BUERTO SOLDABLE	---	1	ACERO AL CARBÓN

NOTAS :

- 1.- SE REQUIERE 1 TOLVA PARA EL PRECALENTADOR DE AIRE
- 2.- LAS CANTIDADES INDICADAS EN LA LISTA DE MATERIALES SON PARA 1 TOLVA
- 3.- LAS TOLVAS SE FABRICARÁN CON PLACA DE ACERO AL CARBÓN ASTM A 36 DE 3/16" ESPESOR
- 4.- EL PALETO DEBE OBTENER LA PLANTILLA DE LOS DOBLADOS CONFORME A LAS MEDIDAS NOMINALES QUE SE INDICAN EN ESTE PLANO DE FABRICACIÓN



VISTA A-A



ESC: SIN

FESC-UNAM

OCT 2, 1998

DIB: TAFEM

ACOT: mm

TOLVA DE SALIDA

REV:FDC/HR

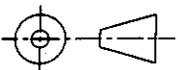


FIG No: 16

CAPITULO 4.

PROCESO DE FABRICACIÓN.

Usualmente la fabricación de un equipo es un sistema complejo. Ya que los problemas de diseño y fabricación están interrelacionados, una vez que se han tomado las decisiones de diseño, los problemas para la fabricación están definidos con más claridad. El diseño puede indicar ciertas pautas a seguir durante la fabricación; sin embargo, el problema es producir un equipo cuyos materiales, propiedades, formas, tolerancias, tamaño y acabado cumplan las especificaciones establecidas por el diseñador.

A continuación se comentan algunos de las consideraciones prácticas que se sugieren para llevar a cabo la fabricación del Precalentador de Aire-Agua de Purga.

4.1. Soldaduras en serpentines.

Toda las soldaduras, procedimientos de soldado, calificaciones y calificación de soldadores deberán de estar de acuerdo con las normas de la AWS (American Welding Society) y la sección IX del código ASME. Los procedimientos de soldadura deberán de establecerse antes de iniciar cualquier soldadura. Para juntas precalificadas los procedimientos de soldadura deberán de cumplir con el apéndice del AWS D1.1.

Los electrodos y alambres soldadores deberán de ser conservados limpios, secos y adecuadamente almacenados de acuerdo a las recomendaciones del fabricante. No se usará ningún electrodo o alambre de aporte sucio, grasoso u oxidado. Todas las superficies a

soldar deberán estar limpias y libres de pintura, aceite, polvo, incrustaciones, óxido y otros materiales nocivos a la soldadura.

Los cordones de soldadura deberán ser formados adecuadamente para permitir la fusión completa a los lados del reborde de los mismos y minimizar la escoria. Toda escoria o excedente sobre cualquier reborde de los mismos deberá removerse completamente. Cualquier fisura o ampolla que aparezca en la superficie de cualquier cordón de soldadura se eliminará por esmerilado antes de colocar el siguiente cordón.

Las socavaciones que excedan de 0.8 mm. ó el 10% del miembro más delgado, lo que sea menor, no serán aceptables. Las soldaduras de refuerzo deberán de ser de 3.2mm. máximo entre las superficies colindantes y deberán tener una transición gradual (30° máximo) al plano de la superficie del metal base.

Se deberá mantener una inspección constante y cuidadosa para asegurar un maquinado adecuado, así como superficies limpias y secas, antes de soldar. Las soldaduras terminadas deberán quedar libres de incrustaciones y serán probadas, ya sea con líquidos penetrantes o partículas magnéticas, para detectar fisuras o imperfecciones. Las soldaduras con fisuras o imperfecciones deberán de eliminarse y repararse, examinándolas nuevamente como si fueran soldaduras originales.

4.2. Pruebas hidrostática en serpentines.

Una vez que se ha completado el armado de los serpentines del precalentador, deberán probarse hidrostáticamente según los apartados R-1.31y R-1.5 de las especificaciones TEMA, a una presión 1.5 veces mayor que la presión de diseño

El agua usada en las pruebas no deberá de contener mas de 25 ppm de cloruros; la presión de prueba deberá de mantenerse por lo menos 1 hora para detectar fallas. El agua será drenada completamente después de efectuada la prueba, y se aplicará un lavado final en todas las partes.

Por cuestiones de seguridad puede realizarse una prueba neumática suplementaria a una presión de 25 psi (170Kpa).

4.3. Tratamiento térmico

Los métodos de tratamiento térmico aceptables en las soldaduras, se enlistan a continuación, en orden de preferencia; sin embargo, deberá emplearse el que sea más práctico según sea el caso.

- a) Método de horneado.
- b) Método de resistencia local.
- c) Método de inducción local.

Ninguna operación de soldadura podrá efectuarse después del tratamiento térmico.

4.4. Prueba de hermeticidad del equipo.

Una vez probados los serpentines se procederá a realizar las pruebas de hermeticidad del equipo, ensamblado en su totalidad (sellos mecánicos y las juntas de asbesto con su refuerzo de silicón térmico). Para este fin se deberán maquinar tapas ciegas para aislar la carcasa del equipo, y éste se llenará de agua.

Como en las pruebas hidrostáticas, el agua no deberá de contener mas de 25 ppm de cloruros.

4.5. Embarque del equipo.

Una vez que se ha concluido el proceso de fabricación, el equipo deberá trasladarse al sitio de instalación; ya sea para pruebas o para operación. Esto requiere de una serie de precauciones que deben ser tomadas en consideración para proteger la integridad del equipo, y permitir que el proceso de operación se lleve a cabo de manera exitosa.

En el embarque del equipo, las superficies metálicas deberán pintarse de acuerdo a lo siguiente:

De cualquier forma, todas las superficies que se vayan a pintar deberán limpiarse mediante chorro de arena (sand-blasted) para eliminar todos los materiales extraños. Una vez que la superficie a pintar esté completamente limpia, se aplicará una capa de primario de cromato de zinc para superficies con temperaturas debajo de 149°C (300°F). Para temperaturas arriba de 149°C (300°F) se aplicará una capa de pintura de aluminio resistente al calor.

Las superficies maquinadas y caras de bridas deberán recubrirse con grasa gruesa para prevenir la corrosión.

Todas las roscas de tornillos, incluyendo las partes expuestas deberán cubrirse con un material resistente al agua para evitar daños y corrosión durante el embarque y almacenaje.

CAPITULO 5.

FABRICACION Y PRUEBAS DEL PROTOTIPO.

Continuando con el proceso de diseño, y una vez terminada la ingeniería de detalle (planos), se procedió a iniciar la etapa de procura y adquisición de materiales necesarios para llevar a cabo la fabricación del prototipo (todo esto en función de la lista de materiales de los planos).

El proceso de fabricación de los equipos se hizo en los talleres del IMP por personal altamente calificado, bajo la supervisión del Departamento de Diseño Mecánico Estructural de Equipos de Combustión.

Cabe hacer mención que el diseño original tuvo que ser modificado debido a que el tiempo de suministro de algunos materiales era muy prolongado. El principal problema que se tuvo que enfrentar fue el redimensionamiento de los maquinados sobre las carcasas y espejos de los equipos, debido a que los codos de radio corto y retornos tipo "U" no se encontraron en el país y las piezas de ensamble ya se habían maquinado para ser montadas con los accesorios, por lo que se tuvieron que fabricar accesorios que cumplieran con las condiciones de dimensión del diseño original y se recurrió a perfiles cuadrados (PTR) con barrenos que cumplieran con las restricciones impuestas por el diseño original.

El diseño modular de los equipos y la sustitución de soldaduras por dobleces en las placas de las carcasas, hizo que la fabricación fuera más ágil y redujo costos.

Se tuvo especial cuidado en inspeccionar cada uno de los elementos soldados de los equipos para evitar posibles fallas y se realizaron

pruebas de comportamiento (prueba hidrostática) y de hermeticidad a la carcasa.

Antes de tomar la decisión de sustituir codos, té, retornos tipo "u" y reducciones se realizó un estudio hidráulico de los equipos para garantizar que las pérdidas a lo largo de los serpentines no influyeran en la presión del agua de alimentación.

5.1. Materiales utilizados en la fabricación.

La fabricación de los serpentines y sus accesorios fue hecha de ensambles con tubos de 3/4", 1 1/2", y PTR de 1 1/2" de Acero al Carbono. Asimismo, la carcasa se fabricó de placas y soleras de acero estructural ASTM A-36; lo mismo en las tolvas, ductos y espejos.

5.2. Procesos de aplicación de soldadura en los serpentines.

Debido a la construcción modular del equipo, las consideraciones de soldadura más importantes se generan en el serpentín de tubos. Para unir todas las partes del serpentín se utilizó soldadura de arco eléctrico con electrodos revestidos de la serie AWS-7018.

Una vez concluido el proceso de soldadura se realizaron las siguientes inspecciones:

- Inspección visual.
- Inspección con líquidos penetrantes.
- Prueba hidrostática.

Es importante aclarar que cualquier discontinuidad en la soldadura debe ser corregida completamente y, una nueva inspección debe realizarse.

Los resultados de la prueba hidrostática se muestran en la tabla (9).

TABLA 9. Resultados de la prueba hidrostática del serpentín.

Prueba hidrostática del serpentín		
(Presión de Prueba 18 kg/cm²)		
Unión PTR - Tubo de 3/4"	640 Soldaduras	Ok
Tapas de PTR	320 Soldaduras	Ok
Uniones de PTR y Tubo de 1, 1/2"	160 Soldaduras	Ok

5.3. Etapa de montaje.

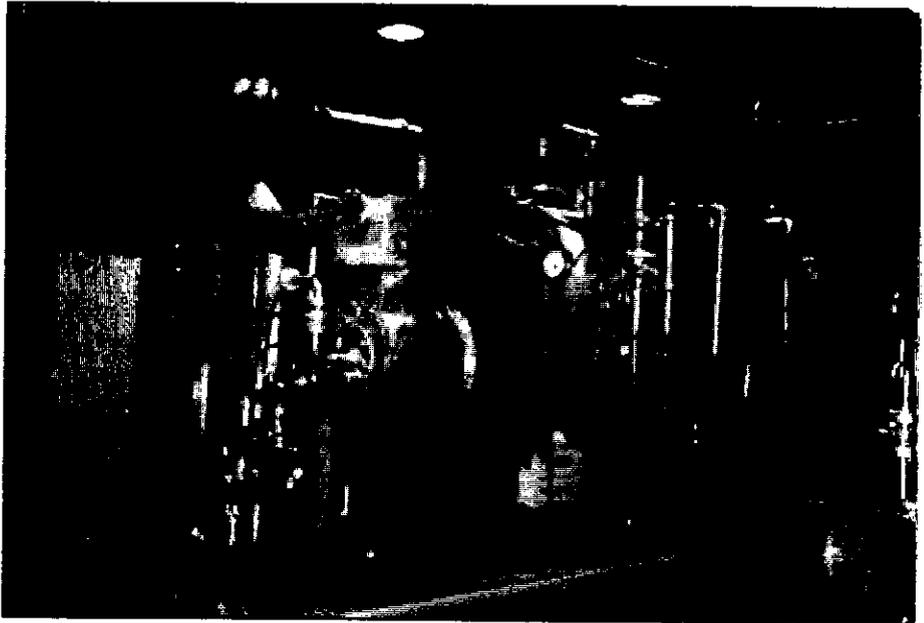


FIGURA 17. Vista general del Precalentador de aire-agua de purga y la caldera del laboratorio de combustión.

Una vez terminada la fabricación de todas las partes del PAAP, se procedió a transportarlas al Laboratorio de Combustión de "La Reforma", Pachuca Hgo., lugar donde se montaría y se le practicarían pruebas de comportamiento.

**ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA**

Durante la etapa de montaje se hicieron algunos ajustes de construcción para adaptarse a las instalaciones existentes del laboratorio. Las

actividades que se realizaron debido a estos ajustes fueron las siguientes:

Modificación de un ducto con cortes angulados para alinear PAAP con la salida del ventilador de tiro forzado, así como el ducto de salida del precalentador al quemador de la caldera. Todo esto debido al reducido espacio disponible para colocar el equipo y para no afectar a los equipos existentes; evitando maniobras complejas de desmonte (Fig.18).

Se modificaron los circuitos de alimentación de agua y gases de combustión.

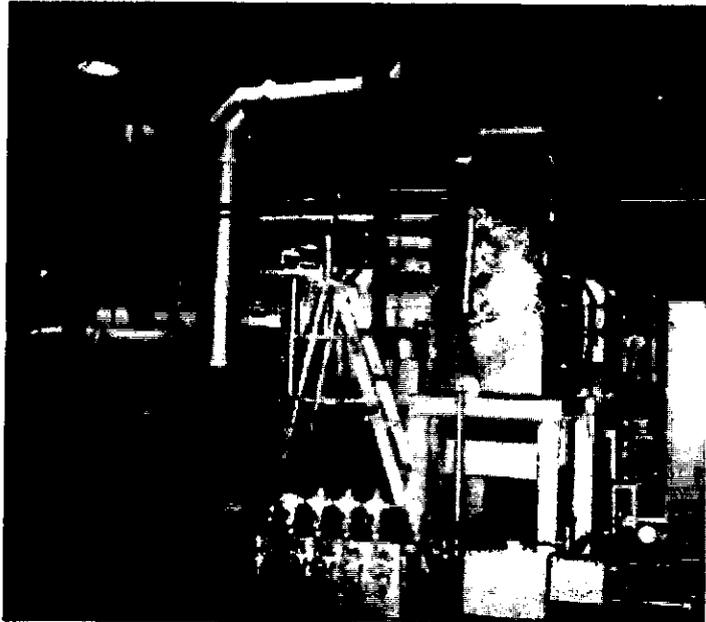


FIGURA 18. Vista general del precalentador de aire-agua de purga EAA-01, el ventilador de tiro forzado de la caldera, su sistema de bombeo de combustible y los gabinetes de los sistemas de control.

Se adaptaron equipos extras que facilitarían el enfriamiento del agua de recuperación para alimentación al economizador condensante.

5.4. Circuito de prueba del PAAP.

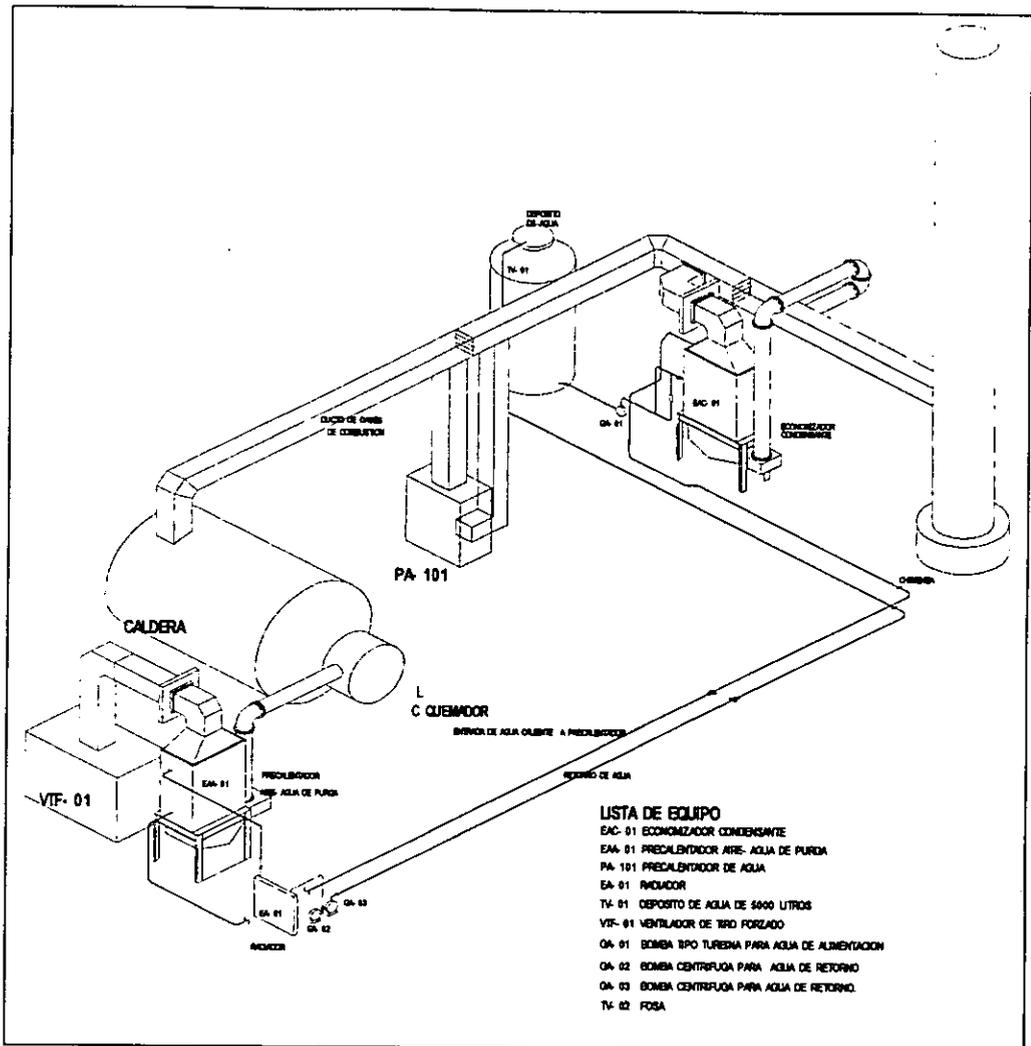


FIGURA 19. Circuito de prueba del PAAP.

Circuito de agua de proceso. El circuito de agua de proceso del precalentador de aire-agua de purga comienza en el depósito de agua TV-01 de 5000 litros de capacidad, del cual se abastece de agua mediante una bomba de turbina GA-01 al economizador condensante EAC-01(Ver fig.19). El agua alimentada entra al equipo por los

serpentines inferiores y sale por los superiores ya precalentada por el efecto de calentamiento de los gases de combustión y condensación del vapor de agua de combustión y otras especies químicas de los gases de combustión. El agua caliente emergente del economizador es enviada hasta el precalentador de aire-agua de purga PAA-01. En el economizador aire-agua de purga el agua caliente entra por los serpentines inferiores del equipo y emerge por los superiores ya fría al ceder su energía al aire de combustión, para posteriormente enviarse al radiador EA-01 con la finalidad de mantener el agua lo más fría posible, y bombearla con las bombas GA-02 y GA-03 hacia el depósito de agua TV-01, cerrándose así el circuito de agua de proceso para las corridas experimentales del PAAP.

Circuito de gases de combustión. El circuito de gases de combustión comienza en el ventilador a tiro forzado VTF-01, el cual envía aire de combustión, a través del precalentador de aire-agua de purga PAA-01, hacia el quemador de la caldera calentándose a su paso al absorber la energía cedida por el agua caliente proveniente del economizador condensante.

Por otro lado se envía ya sea combustóleo o gas natural hacia el quemador, efectuándose en éste el quemado de los combustibles. Los gases de combustión emergentes de la caldera posteriormente se envían directamente al economizador condensante o se enfrían previamente en el economizador de tubos PA-101 de la caldera. En este equipo únicamente se efectúa la transferencia de calor sensible de los gases de combustión al agua de caldera.

Los gases de combustión enviados al economizador condensante entran por la parte superior del equipo en contracorriente al agua de proceso, para posteriormente emerger fríos por la sección inferior del

economizador y ser enviados hacia el ducto de gases de combustión principal y de allí hacia la chimenea.

Agua de condensación. El agua de gases de combustión que se condensa en el economizador condensante se extrae por el fondo de éste y se recupera como muestra o se envía a drenaje.

5.5. Desarrollo del experimento.

Con el fin de obtener información real del comportamiento del PAAP se llevaron a cabo varias corridas experimentales. En este experimento se simularon las condiciones de funcionamiento del PAAP a una escala reducida; con el fin de poder estimar su rendimiento escalado a un equipo de mayores dimensiones.

Básicamente se pretende aislar el efecto individual de cada variable sobre el comportamiento de los equipos y de los modelos, comparando posteriormente las temperaturas de salida en diferentes puntos de los equipos de los fluidos calientes y fríos tanto de las corridas experimentales como la de los modelos. De esta manera se puede detectar de manera más selectiva los modelos a mejorar o modificar en la metodología de diseño y simulación de los equipos.

Se espera que el experimento proporcione información para detectar los factores de mayor peso en el comportamiento de los equipos, para que se detecten como críticos durante la operación de estos sistemas.

Las variables a medir fueron las temperaturas de los fluidos caliente y frío en diferentes partes del equipo, las cuales dependen de los flujos máxicos de los fluidos, temperaturas de entrada, área de transferencia, velocidades de fluidos, etc.

Se seleccionaron los siguientes parámetros como variables independientes a variar, dado que experimentalmente se ha encontrado que son los principales factores involucrados en los fenómenos de transferencia de masa y energía y por ende en los modelos matemáticos:

- Área de transferencia de calor.
- Composición del gas de combustión (Exceso de aire, Tipo de combustible).
- Flujo de gases de combustión/Agua de "purga" (Fluido caliente).

Con base a la experiencia operativa del personal de La Reforma, se estimaron los tiempos de estabilización de la caldera y periféricos, entendiéndose como estabilización la condición de régimen permanente. La información de instrumentos fue registrada en hojas diseñadas para el caso (la ubicación de los instrumentos en se muestra en los planos de detalle). La información durante cada corrida fue registrada cada 2.5 minutos en periodos de corridas de 30 minutos (Tabla 10). Los datos de los sistemas del laboratorio fueron registrados cada 5 minutos aproximadamente.

Tabla 10. Corridas experimentales.

CORRID A	DESCRIPCION	PARAMETROS FIJOS	PARAMETROS A MEDIR	TIEMPO ESTIMADO DE CORRIDA	TIEMPO ESTIMADO DE ESTABILIZACION	DIAS
1.A	FLUJO DE AGUA EN EL PAAA	Fbg	Tg, Ta		Arranque: 40 min.	
	Fa1			30 min	0 min	
	Fa2			30 min	20-30 min	
	Fa3			30 min	20-30 min	
1.B	FLUJO DE AIRE EN EL PAAP	Fba	Tg, Ta		Arranque: 30 min	(6 HORAS OPERACION / DIA)
	Fg1			30 min	0 min	
	Fg2			30 min	20 min	
	Fg3			30 min	20 min	

Nomenclatura.

Fbae: Flujo base de agua a la entrada del economizador (3600 l/h).

Fbge: Flujo base de gases de combustión a la entrada del economizador
(El generado por la caldera al 100% de capacidad, exceso de aire mínimo y economizador sensible al máximo)

Tg: Temperatura de gases de combustión.

Ta: Temperatura de agua.

La información recopilada en campo se muestra en las tablas 11-14.

Es importante mencionar que en el Precalentador de aire-agua de purga se encontró una fuerte significación en los parámetros de flujo de aire, área de transferencia y temperatura de agua. Es interesante la alta sensibilidad existente en la variación de la temperatura en la magnitud de energía transferida hacia el aire, requiriéndose un poco variación para lograr efectos interesantes en la temperatura del aire (Figura 20).

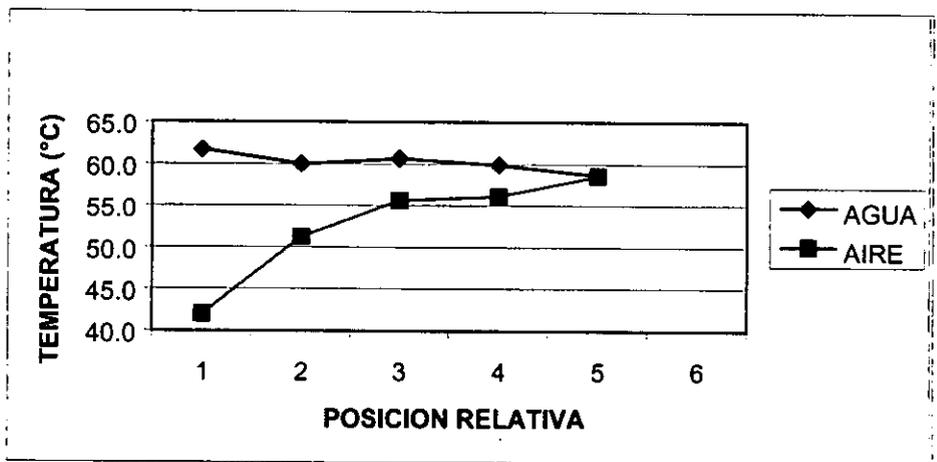


Figura 20. Perfil de temperaturas en el PAAP.

**TABLA 11. Datos experimentales del PAAP.
ECONOMIZADOR CONDENSANTE**

CORRIDA	FLUJO		PRESION					
	FI - 01	PI - 01	PI - 02	(PI-01)-(PI-02)	PI - 03	PI - 04	PI - 05	(PI-03)-(PI-05)
	LPM	kg/cm2	kg/cm2	kg/cm2	mm. Agua	mm. Agua	mm. Agua	mm. Agua
AACG.O. BASE	60	3.97	3.90	0.07	19.00	18.31	18.54	0.46
AACG.A 1	60	3.91	3.74	0.17	19.00	18.00	17.62	1.38
BASE	60	3.97	3.90	0.07	19.00	18.31	18.54	0.46
AACG.B 1	70	4.20	4.00	0.20	19.23	18.23	18.62	0.62
BASE	60	3.97	3.90	0.07	19.00	18.31	18.54	0.46
AACG.C 1	60	3.69	3.58	0.11	12.31	12.00	11.62	0.69
BASE	60	3.97	3.90	0.07	19.00	18.31	18.54	0.46

**TABLA 12. Datos experimentales del PAAP.
PAAP**

ECONOMIZADOR CONDENSANTE

CORRIDA	TEMPERATURA															
	TI-01	TI-02	TI-03	TI-04	TI-05	TI-06	TI-07	TI-08	TI-09	TI-10	TI-11	TI-12	TI-13	TI-14		
°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C		
AACG.O. BA SE	62	60	61	60	64	42	51	56	56	56	59	39	54	202	86	88
AACG.A 1	64	62	62	F.O.	42	42	43	44	55	60	60	42	60	205	103	96
BA SE	62	60	61	60	64	42	51	56	56	56	59	39	54	202	86	88
AACG.B 1	61	60	60	60	60	54	40	51	56	60	60	43	59	207	95	101
BA SE	62	60	61	60	64	42	51	56	56	56	59	39	54	202	86	88
AACG.C 1	67	65	65	65	58	40	52	59	61	63	63	46	64	210	116	0
BA SE	62	60	61	60	64	42	51	56	56	56	59	39	54	202	86	88

**TABLA 13. Datos experimentales del PAAP.
CALDERA**

CORRIDA	VAPOR			COMBUSTIBLE			VENTILADOR			GASES		
	PRESIO N DE VAPOR DE CALDER A	FLUJO GAS NATURA L	PRESIO N DESCAR GA DESPUE S MEDIDO R DE FLUJO	TEMPER ATURA	SALIDA FDF	PASO 1	HOGAR	SALIDA CALDE RA	AIRE	TEMPERATURA GAS ESCAPE		
	kg/cm ²	m ³ /h	kg/cm ²	°C	mm H ₂ O	°C	°C					
AACG.O.	7	190	2	29	800	155	135	30	55	233		
AACG.A	7	190	2	29	800	159	135	30	54	234		
AACG.B	7	190	2	29	800	155	135	30	55	233		
AACG.C	7	190	2	29	800	166	140	30	54	234		
	7	190	2	29	800	155	135	30	55	233		
	7	190	2	28	800	173	150	31	57	237		
	7	190	2	29	800	155	135	30	55	233		

**TABLA 14. Datos experimentales caldera-PAAP-chimenea.
CALDERA - PAAP -CHIMENEA**

CORRIDA	Caldera										Temperatura	
	Gases de Combustión										Agua de	Ambiente
	NOX	CO	CO2	O2	SO2	Medidor	No.	Caldera	°C	°C		
AACG.O. BASE	64	39	11	2	0	0	0	25	25	25		
AACG.A 1	65	37	11	2	0	0	0	25	21	25		
BASE	64	39	11	2	0	0	0	25	25	25		
AACG.B 1	65	35	11	2	0	0	0	25	26	25		
BASE	64	39	11	2	0	0	0	25	25	25		
AACG.C 1	66	33	10	3	0	0	0	25	0	25		
BASE	64	39	11	2	0	0	0	25	25	25		

CONCLUSIONES.

El presente trabajo originó las siguientes conclusiones:

1. Fabricar un equipo de características modulares proporciona varias ventajas, entre las que se encuentran:
 - Agiliza los procesos de montaje y reparaciones, reduciendo tiempos y, por lo tanto costos.
 - Facilita el transporte del equipo.
 - En los equipos de recuperación de energía térmica residual, brinda la posibilidad de ampliaciones en la capacidad del equipo.
2. El proceso de diseño de un equipo debe subordinarse a la utilización de materiales con medidas y composiciones estandarizadas, y de fácil adquisición. Esto agiliza los procesos de diseño y fabricación.
3. El diseñador debe estar en contacto directo con el fabricante para conocer las limitaciones impuestas por los procesos existentes de fabricación. Esto con la finalidad de concebir un equipo que se pueda fabricar de la manera más rápida y económica posible.
4. En los equipos de recuperación de energía térmica residual, la hermeticidad es uno de los factores que determinan la eficiencia del equipo; por esto la selección de las juntas, la inspección de las soldaduras y el espesor del aislante juegan un papel muy importante en el desempeño del equipo.

En general, existen muchos factores que se deben considerar para el diseño de un equipo; sin embargo, el factor económico es el principal limitante en la creación de nuevos equipos. Esto hace que las propuestas del diseñador deban ser las más prácticas y de fácil realización.

**ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA**

El PAAP puede ser un equipo de gran aplicación en los equipos de combustión, por su bajo costo de fabricación y su simplicidad. Además; la gran cantidad de energía que puede contener el agua de purga, aunada a la facilidad de del aire para absorber esta energía, hacen que este equipo puede lograr el ahorro de cantidades considerables en el consumo de combustibles. Sin embargo, su utilización está supeditada a un análisis de factibilidad económica, que contemple el costo del equipo y el de las maniobras de modificación y montaje en la instalación original.

BIBLIOGRAFÍA.

- ❖ [1] Ricardo Pulido Pérez. "Beneficios de la Tecnología de Ingeniería para la recuperación de Energía residual de desecho". Instituto Mexicano del Petróleo. México.
- ❖ [2] Michael Henthore, Carpenter Technology Corp. "Materials Selection for Corrosion". Chemical Engineering, Marzo 6, 1972. Pag. 113.
- ❖ [3] Norma PEMEX No. 2.313.02, Aislamientos térmicos para bajas temperaturas.
- ❖ [4]. Turner, W. C., and J.F. Malloy. "Handbook of thermal insulation design economics for pipes and equipment," New York, 1980.
- ❖ [5]. "Standards of Tubular Exchangers Manufacturers Asociation (TEMA)".
- ❖ [6]. Schweppe, J. L. & Torrijos, C. Q. "How to rate Finned-Tube Convection in Fired Heaters", Hydrocarbon Processing & Petroleum Refiner, Junio, 1964.
- ❖ [7]. M.F. Spotts. "Proyecto de elementos de máquinas".
- ❖ [8]. Harry D: Moore y Donald R. Kibbey. "Materiales y procesos d fabricación".
- ❖ [9]. Instituto Mexicano del Petróleo. "Práctica de ingeniería ECD-201. Diseño y fabricación de Calentadores a fuego directo".

- ❖ [10]. American Petroleum Institute. "Recomended practice 530. Calculation of heater-tube thickness in petroleum refineries.
- ❖ [11]. Instituto Mexicano del Petróleo. "Diseño operación y mantenimiento de calderas de tubos de agua".
- ❖ [11]. SELMEC. "Manual de calderas".
- ❖ [11]. Donald Q. Kern. "Procesos de transferencia de calor".
- ❖ [12]. Howard F. Raise. "Ingeniería de proyectos para plantas industriales".

ANEXO A.

Anexo A. Criterios de diseño termohidráulico.

Basándose en la experiencia documentada en el diseño de equipos de combustión, y apoyándose en estándares ya establecidos para equipos similares, se ha propuesto lo siguiente como punto de partida para el diseño de un precalentador de aire-agua de purga (**PAAP**):

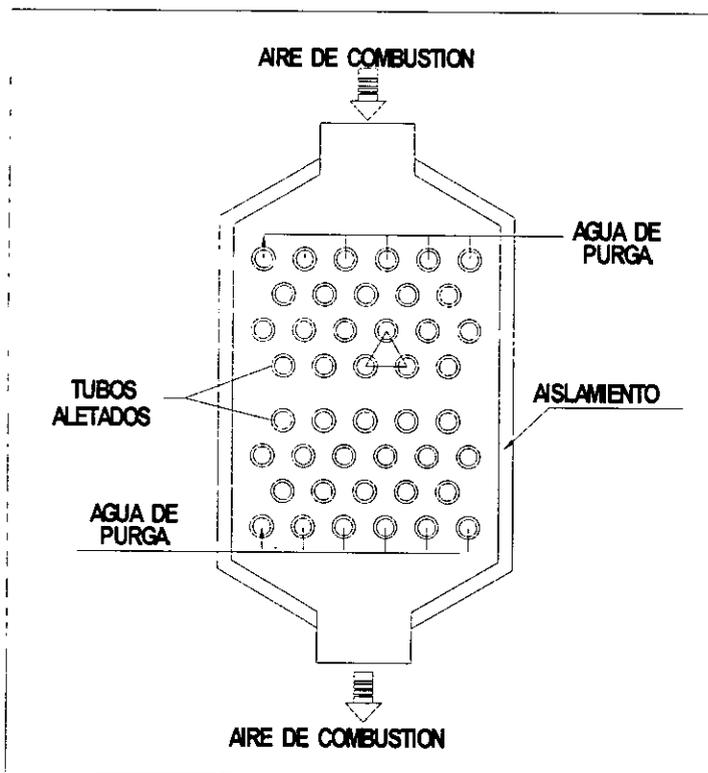


Fig. 1. Corte transversal de un PAAP.

Un precalentador de aire de este tipo consta de una sola sección en la que se recupera el calor sensible de la purga continua de los generadores de vapor (Fig. 1).

Es recomendable el uso de tubería con superficie extendida en el banco de tubos para reducir el tamaño del equipo.

Las dimensiones generales de un equipo como éste deberán aproximarse a la relación:

$$\frac{\text{Largo}}{\text{Ancho}} \leq 3$$

Una relación mayor de estas dimensiones requiere de un distribuidor de gas, cuyo diseño además de ser más voluminoso y costoso, favorece la formación de corrientes preferentes ociosas en el equipo.

1. Tubos y su Arreglo.

Se recomienda utilizar diámetros de tubos mayores o iguales a 12mm y menores o iguales a 50mm.

Existen varios arreglos para los tubos, los arreglos estándar se muestran en la figura 2. ^[5]

El arreglo triangular favorece la turbulencia del aire, situación deseable debido a que incrementa el coeficiente de transferencia de calor por convección.

Para un arreglo triangular el espaciamiento entre centros debe ser de al menos 1.25 veces el diámetro exterior del tubo.

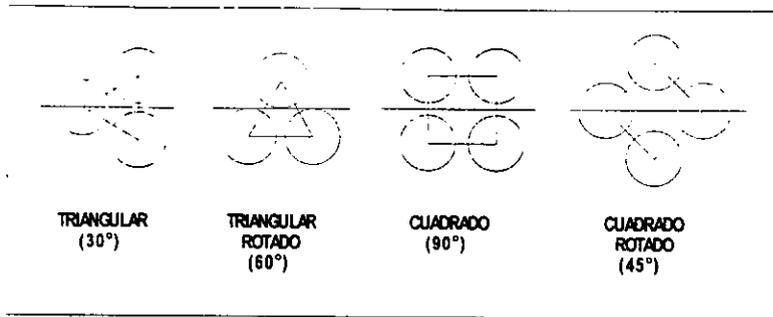


Fig.2 Arreglo de tubos.

2. Masa velocidad y caída de presión.

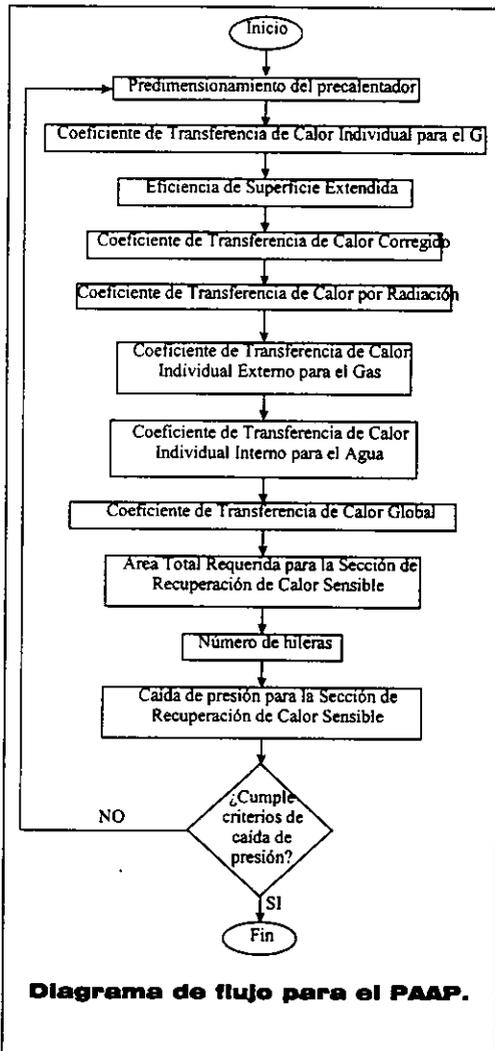
El fenómeno de transferencia de calor por convección es función directa de la masa velocidad de los fluidos que intercambian calor. Así, mientras mayor es la masa velocidad de los fluidos, mayor es el coeficiente de transferencia de calor, lo que se ve reflejado en un equipo de menor tamaño, y por lo tanto más atractivo económicamente.

Para tener un diseño óptimo del precalentador de aire-agua de purga se recomiendan los siguientes valores:

- 1) La caída de presión del lado de los tubos no debe ser mayor de 98 kPa.
- 2) La caída de presión del lado de los gases debe estar dentro del intervalo de 490 a 980 Pa.
- 3) La velocidad del aire debe ser aproximadamente de 4.5 m/s.
- 4) La velocidad del agua debe ser de 2.0 a 3.0 m/s.

3. Metodología del cálculo termohidráulico.

Una vez definido el arreglo geométrico básico a través de la aplicación de los criterios de diseño, se procede a predimensionar el equipo y a evaluar térmicamente el arreglo propuesto.



EL algoritmo de cálculo está constituido por tres partes principales:

- Balance de materia.
- Balance de energía
- Transferencia de calor en la sección sensible

El balance de materia calcula la masa de aire a precalentar y la masa de agua de purga continua requerida para dicho servicio.

El balance de energía se expresa como flujos térmicos y se realiza en función de las temperaturas del aire y del agua de purga continua, tomando en cuenta que en este proceso no existirá el fenómeno de condensación.

El único mecanismo de transferencia de calor que existe es

convectivo; es decir, transferencia de calor sensible del agua de purga al aire.

Para evaluar las dimensiones y los coeficientes de transferencia de calor del precalentador se utiliza la metodología planteada por Schweppe y Torrijos.^[6] Este método se seleccionó debido a la gran similitud que tiene este equipo con la sección de convección de los calentadores a fuego directo.

El diagrama de flujo que aparece al lado, esquematiza la secuencia de cálculo a seguir, y posteriormente se desglosan las ecuaciones empleadas.

Para establecer las dimensiones preliminares como el ancho y largo del precalentador se emplean las siguientes ecuaciones, para posteriormente seguir con la evaluación térmica.

$$\text{ancho} = Nt * St + 3 * d_{nom}$$

$$\text{largo} = 1.5 * \text{ancho}$$

Ahora bien, se calcula la masa velocidad del aire y en función de ésta y de la temperatura de película del mismo se obtiene el coeficiente de transferencia de calor individual para el tubo liso.

$$h_{ce} = 1.3 * \frac{T_{pge}^{0.28} * Gg^{0.6}}{d_{ext}^{0.4}}$$

Aunque la transferencia de calor por radiación sea pequeña, su contribución se toma en cuenta utilizando la siguiente ecuación:

$$h_{re} = \sigma * E_{tubo} * \frac{T_{te}^4 - T_{aire}^4}{T_{te} - T_{aire}}$$

Por lo tanto, el coeficiente de transferencia de calor individual para el aire es:

$$h_o = h_{ce} + h_{re}$$

Para calcular el coeficiente de transferencia de calor interno se utilizan la ecuación propuesta por Sieder y Tate:

$$h_i = 0.027 * \left(\frac{k_{H_2O}}{d_{int}} \right) * Re^{0.8} * Pr^{1/3}$$

Después se refiere al diámetro externo del tubo con la ecuación siguiente:

$$h_{io} = h_i * \left(\frac{d_{int}}{d_{ext}} \right)$$

Despreciando el factor de resistencia ofrecido por la pared metálica del tubo y envolvente, el coeficiente de transferencia de calor global de diseño es:

$$U_d = \frac{1}{\frac{1}{h_o} + \frac{1}{h_{io}} + R_{d_{aire}} + R_{d_{agua}}}$$

El área de transferencia de calor requerido para esta sección se obtiene utilizando la siguiente ecuación.

$$A = \frac{q}{DTE * U_d}$$

Para completar el predimensionamiento, se calcula el número de hileras de tubos y la altura de esta sección:

$$N_h = \frac{A}{a_{rd}}$$

$$alt = 0.8660 * N_h * St$$

4. Caída de presión.

En la sección de recuperación de calor sensible la caída de presión a través del banco de tubos aletados, lado carcasa, se evalúa utilizando la siguiente expresión:

$$\Delta P = 0.50 * \frac{f * G_g * L}{\rho_g * D_v} * \left(\frac{D_v}{St} \right)^{0.4}$$

Ahora bien, la caída de presión dentro de los tubos se evalúa con la ecuación:

$$\Delta p = 500 * \frac{f * L_t * \rho_a * v_a^2}{d}$$

Para verificar los valores obtenidos en la evaluación térmica del precalentador se comparan con los establecidos en los criterios de diseño.

Si el valor de la caída de presión dentro y fuera del banco de tubos no se encuentra en los intervalos establecidos por los criterios de diseño es necesario efectuar ajustes en el dimensionamiento del equipo, es decir, las dimensiones preliminares se modificarán de tal forma para que los resultados obtenidos en la nueva evaluación térmica e hidráulica caigan dentro de los parámetros de diseño.

Es recomendable el uso de tubería con superficie extendida en el banco de tubos para reducir el tamaño del equipo.

Las dimensiones generales de un equipo como éste deberán aproximarse a la relación:

$$\frac{\text{Largo}}{\text{Ancho}} \leq 3$$

Una relación mayor de estas dimensiones requiere de un distribuidor de gas, cuyo diseño además de ser más voluminoso y costoso, favorece la formación de corrientes preferentes ociosas en el equipo.

1. Tubos y su Arreglo.

Se recomienda utilizar diámetros de tubos mayores o iguales a 12mm y menores o iguales a 50mm.

Existen varios arreglos para los tubos, los arreglos estándar se muestran en la figura 2. ^[5]

El arreglo triangular favorece la turbulencia del aire, situación deseable debido a que incrementa el coeficiente de transferencia de calor por convección.

Para un arreglo triangular el espaciamiento entre centros debe ser de al menos 1.25 veces el diámetro exterior del tubo.

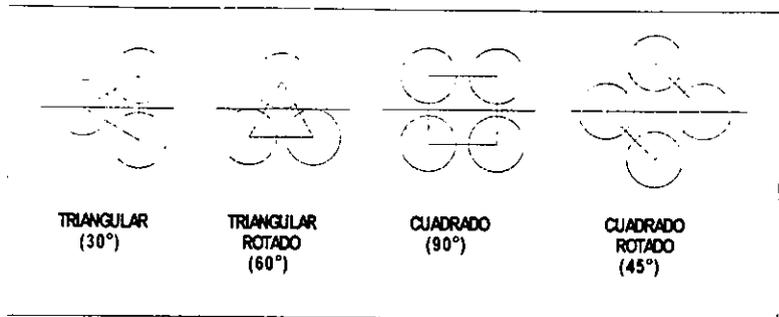


Fig.2 Arreglo de tubos.

2. Masa velocidad y caída de presión.

El fenómeno de transferencia de calor por convección es función directa de la masa velocidad de los fluidos que intercambian calor. Así, mientras mayor es la masa velocidad de los fluidos, mayor es el coeficiente de transferencia de calor, lo que se ve reflejado en un equipo de menor tamaño, y por lo tanto más atractivo económicamente.

Para tener un diseño óptimo del precalentador de aire-agua de purga se recomiendan los siguientes valores:

- 1) La caída de presión del lado de los tubos no debe ser mayor de 98 kPa.
- 2) La caída de presión del lado de los gases debe estar dentro del intervalo de 490 a 980 Pa.
- 3) La velocidad del aire debe ser aproximadamente de 4.5 m/s.
- 4) La velocidad del agua debe ser de 2.0 a 3.0 m/s.

ANEXO B.

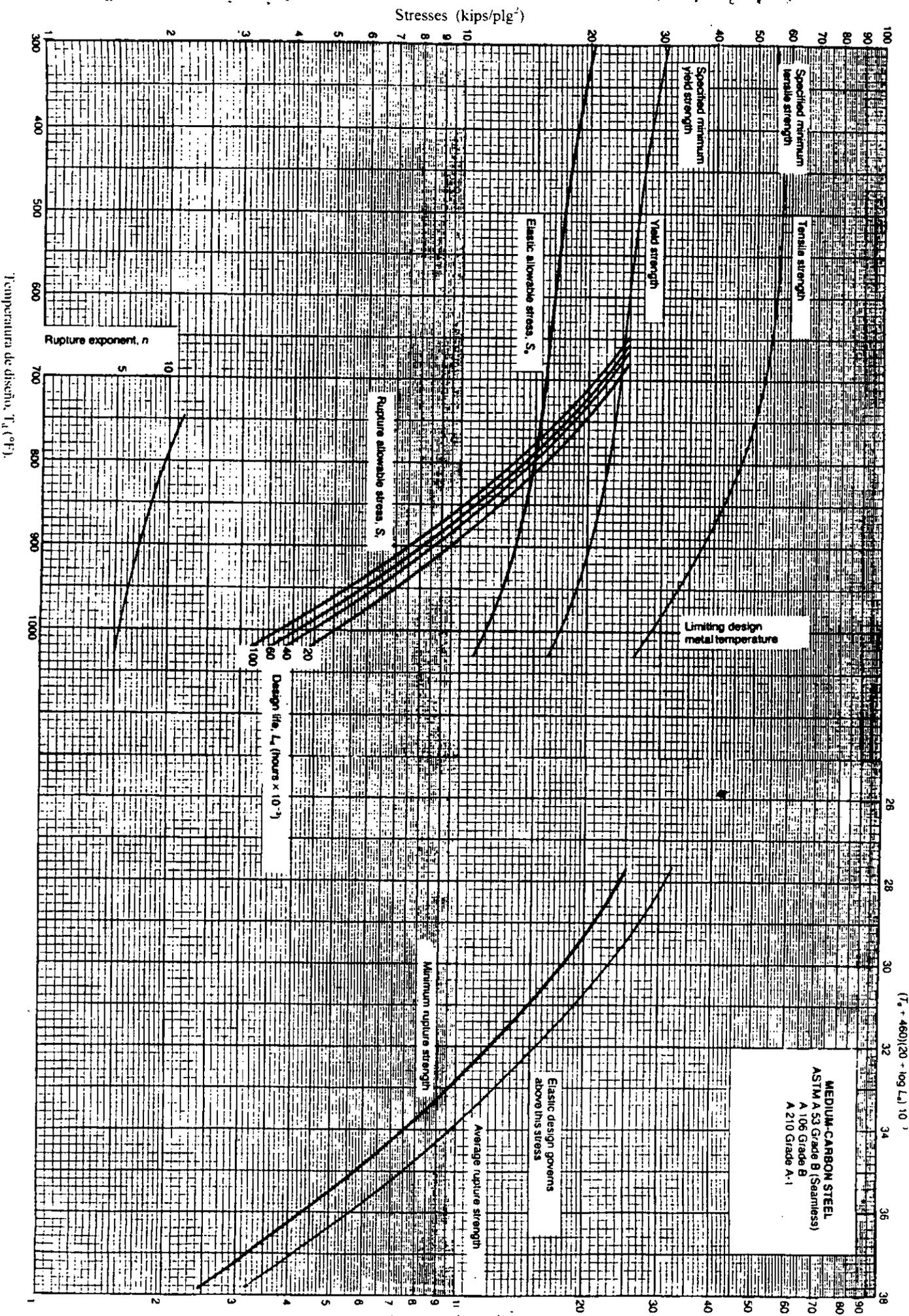


FIGURA 2B. Acero de medio carbono; ASTM A53 Grado B (sin costura), A 106 Grado B, A201 Grado A-1.

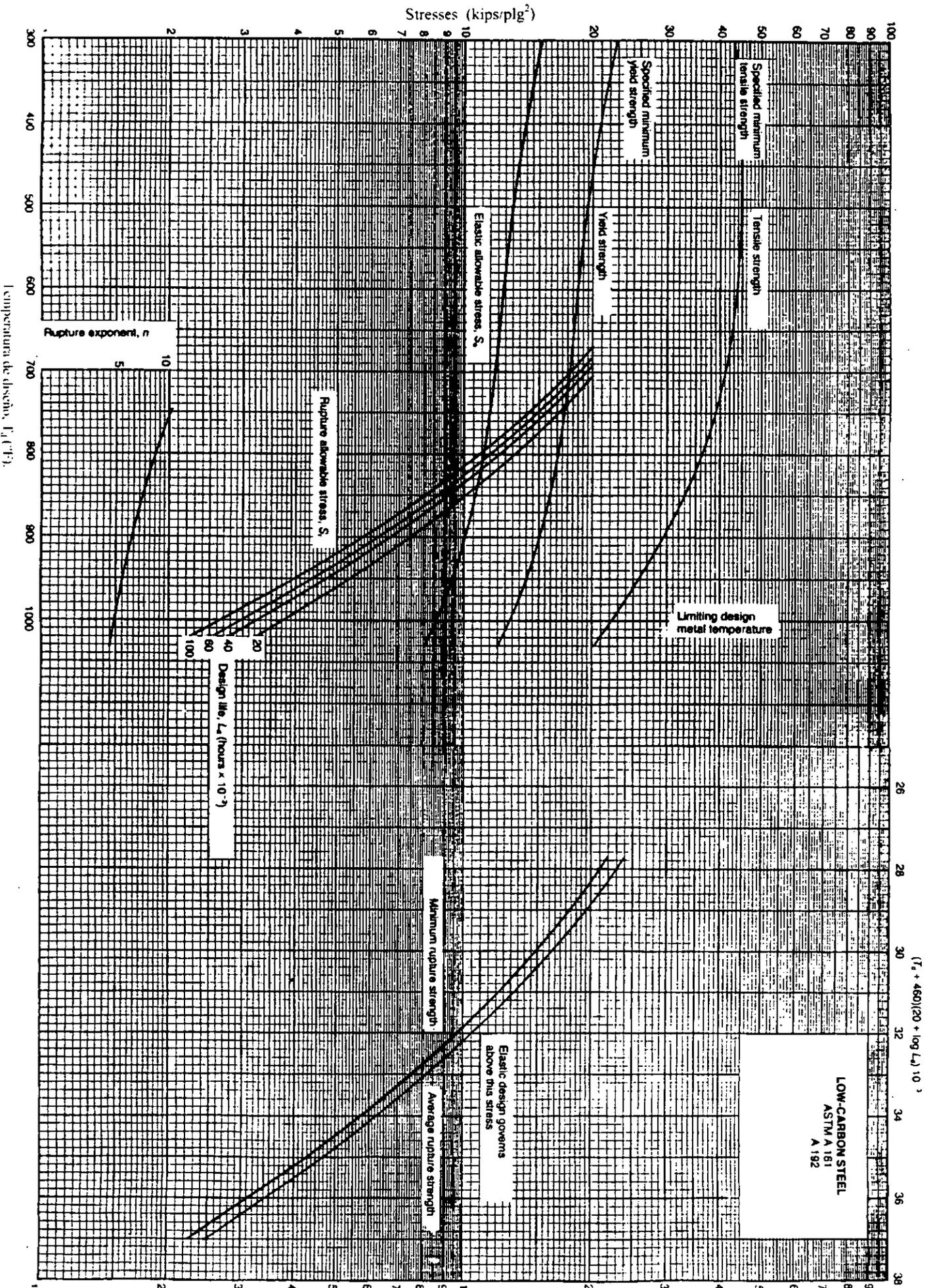


FIGURA 1B. Acero de bajo carbono, ASTM A161, A 192.

GLOSARIO DE TÉRMINOS.

- **Cabezal.** Es un accesorio que generalmente se usa para conectar los extremos de dos tubos adyacentes
- **Combustible.** Toda sustancia que combinada con el oxígeno del aire, produce luz, calor y desprendimiento de gases. Existen tres tipos de combustibles: sólidos, líquidos y gaseosos.
- **Conductividad Térmica.**
- **Convección.** Transferencia de calor debida al movimiento de un fluido.
- **Domo.** Carcaza cilíndrica cerrada por ambos lados diseñada para resistir una presión interna
- **Espejos.** Soportes extremos de las tuberías dentro de un equipo de intercambio térmico.
- **Hidrocarburos.** Compuesto químico de hidrógeno y carbón.
- **Intercambiador de calor.** Recipiente en el cual el calor es transferido de un medio a otro.
- **Quemador.** Dispositivo utilizado para introducir la mezcla aire-combustible, dentro de la cámara de combustión, a la velocidad, turbulencia y concentración deseadas.
- **Serpentín.** Arreglo geométrico de tubos, donde se induce un intercambio térmico entre dos flujos uno de los cuales va en el interior del tubo y el otro circundante a este.
- **Tanque Flash.** Recipiente en el cual se reduce la temperatura a los condensados, de un sistema de alta presión, para llevarlos a la temperatura de saturación dentro la zona de baja presión y producir vapor de media o baja.
- **Temperatura de punto de rocío.** Es la temperatura a la que se produce la primer gota de condensado.

- **Tiro.** Es un gradiente de presiones generado por una diferencia de densidades entre la atmósfera y el interior de sistema abierto.
- **Ventilador.** Máquina compuesta de un rotor y una envolvente usada para mover aire o gases a presiones relativamente bajas.