

2ej



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES "ZARAGOZA"

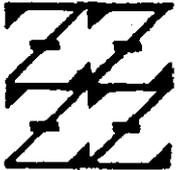
DISEÑO DE UNA CALDERA EXPERIMENTAL A NIVEL PLANTA PILOTO.

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE: INGENIERO QUIMICO PRESENTAN:

CARLOS HORACIO HARRISON BERISTAIN
MARIO ALBERTO MANCERA CORTES

UNAM FES ZARAGOZA



LO HUBIERO CAS DE NUESTRA DEFENSION

ASESOR: ING. JESUS MARIN CRUZ

MEXICO, D. F.

1999.

271021

TESIS CON FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional
Autónoma de México



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

JEFATURA DE LA CARRERA
DE INGENIERIA QUIMICA

OFICIO: FESZ/JCIQ/0031/98

ASUNTO: Asignación de Jurado

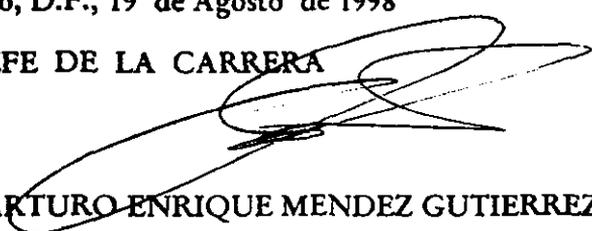
C. MARIO ALBERTO MANCERA CORTES
CARLOS HORACIO HARRISON BERISTAIN
Presente

En respuesta a su solicitud de asignación de jurado para el Examen Profesional, le comunico que la Jefatura a mi cargo ha propuesto la siguiente designación:

Presidente: I.Q. René de la Mora Medina
Vocal: I.Q. Jesús Marín Cruz
Secretario: I.Q. Andrés Aquino Canchola
Suplente: I.Q. Dominga Ortiz Bautista
Suplente: I.Q. Genaro Altamirano García

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
México, D.F., 19 de Agosto de 1998

EL JEFE DE LA CARRERA



I.Q. ARTURO ENRIQUE MENDEZ GUTIERREZ

Este trabajo se realizó en el Instituto Mexicano del Petróleo, ubicado en Eje Central No. 152, México D. F. En la Subdirección de Capacitación y Servicios Técnicos, Gerencia de Productos Químicos, División de Desarrollo de Productos Químicos.

**Bajo la dirección del:
Ing. Jesús Marín Cruz**

**DISEÑO DE UNA CALDERA
EXPERIMENTAL A NIVEL
PLANTA PILOTO**

Que sirva este trabajo como una muestra de nuestro agradecimiento a:

El Instituto Mexicano del Petróleo,

En especial:

Al Ing. Arquímedes Estrada Martínez
Jefe de la División de Desarrollo de Productos Químicos

Al Quím. Sergio Castro Rubira.
Jefe del Departamento de Tratamiento de Aguas

Por las facilidades otorgadas en la realización de este trabajo de tesis.

Al Ing. Jesús Marín Cruz por su valioso apoyo en la realización de este trabajo.

A La Facultad de Estudios Superiores Zaragoza.

Por su invaluable aportación a nuestras vidas.

HONOR A QUIEN HONOR MERECE:

Con dedicatoria especial a
mi madre, por haberme
dado la vida y por haberme
ayuyado a lograr lo que soy.

CARLOS H. HARRISON BERISTAIN

A mi hermana:

M i r i a m.

**Como muestra de mi gratitud
por tu apoyo en los momentos
difíciles.**

CARLOS H. HARRISON BERISTAIN

Hoy he logrado una meta,
que marca el inicio
en el difícil camino de la vida.

Hoy quiero agradecer,
principalmente a dios
y a todas las personas
que con su apoyo y cariño
me ha ayudado a
terminar mi carrera.

Gracias.

MARIO A. MANCERA C.

A mis padres:

Flora Cortés García:

Por todo tu sacrificio y apoyo.

Por tus consejos, en los
momentos más difíciles,
que me ayudaron a salir adelante.

Y por que simplemente sin ti,
no hubiera logrado realizar
mi objetivo.

Mario Mancera Padilla:

Que con ese carácter que tienes,
me ha servido para saber
valerme por mí mismo.

Muchas gracias.

MARIO A. MANCERA C.

A mis padrinos:

Ernesto y Angeles

Que siempre me tendieron su
mano cuando más lo necesitaba.

Y por confiar en mi.

Gracias

MARIO A. MANCERA C.

A mis hermanos:

**Gerardo Cesar
Juan Carlos
Juan Miguel
Hector Manuel
Flor Cecilia**

**Que siempre creyeron en mi.
Sin ustedes no hubiera
llegado hasta aquí.**

MARIO A. MANCERA C.

	PAGINA
CONTENIDO	I
INDICE DE FIGURAS	V
INDICE DE TABLAS	VII
INDICE DE GRAFICAS	VII
RESUMEN	IX
INTRODUCCION	XI
CAPITULO 1.- GENERALIDADES.	1
1.1.- Agua.	1
1.1.1. Características del agua para generación de vapor.	1
1.1.2. Clasificación del agua.	5
1.1.2.1. Clasificación del agua por su origen.	5
1.1.2.2. Clasificación del agua por su aplicación.	6
1.1.3. Agua para calderas.	7
1.1.4. Calidades requeridas del agua para generación de vapor.	8
1.1.5. Tratamiento del agua para generación de vapor.	8
1.1.5.1. Objeto del tratamiento del agua de alimentación de calderas.	10
1.1.5.2. Métodos para el tratamiento del agua para la generación de vapor.	11

1.2. Vapor.	15
1.2.1. Usos y aplicaciones.	16
1.2.2. Propiedades y características del vapor.	17
1.2.3. Termodinámica del vapor.	19
1.2.4 Clasificación del vapor.	20
1.2.4.1. Clasificación del vapor en función del grado de sobrecalentamiento.	20
1.2.4.2. Clasificación del vapor en función de la presión.	21
1.3. Breve historia de las calderas.	22
1.4. Generadores de vapor.	23
1.5. La caldera de vapor.	24
1.6. Sistema de distribución.	26
1.7. Sistemas abiertos	28
1.8. clasificación de las calderas.	29
1.8.1. Calderas de tubos de humo.	32
1.8.2. Calderas de tubos de agua.	36
1.9. Clasificación en función de la presión de operación.	42
1.10. Arreglos en los sistemas de vapor.	43
1.11. Carga de los sistemas de vapor.	44

CAPITULO II. SISTEMA PILOTO DE GENERACION DE VAPOR 45

2.1. - Características Deseables de la Caldera Experimental	46
2.2. - Caldera (Generación de Calor)	49
2.3. - Precaldera (Precalentamiento y deaereación)	52
2.3.1. - Tratamiento del agua de alimentación.	52
2.3.2. - Unidades desmineralizadoras.	53
2.3.3. - La zona de precalentamiento y deaereación.	53
2.4. - Postcaldera (Retorno de condensados)	53
2.5. - Sistema Piloto de Generación de Vapor.	55
2.6. - Descripción del proceso.	56
2.7. - Bases de diseño	57

CAPITULO III.DIMENSIONAMIENTO
DEL EQUIPO.

	63
3.1 Diseño de tubería.	63
3.1.1. Selección del material de la tubería.	63
3.1.2. Dimensionamiento de la tubería.	63
3.1.3. Cálculo del espesor de la tubería	65
3.2. Dimensionamiento de la resistencia eléctrica.	65
3.3. diseño de la caldera experimental.	67
3.3.1. Selección de material y soldadura para CE-1.	67
3.3.2. Dimensionamiento de caldera experimental.	68
3.3.2.1. Dimensionamiento del tubo de prueba.	69
3.3.2.2. Dimensionamiento del brazo de CE-1.	69
3.3.2.3. Dimensionamiento del tubo conector de CE-1.	70
3.3.2.4. Dimensionamiento del cuerpo del equipo CE-1.	70
3.3.2.5. Dimensionamiento de bridas y conexiones del equipo CE-1.	71
3.3.3. Cálculo de espesores de caldera experimental.	73
3.3.3.1. Cálculo de espesor del cuerpo de CE-1	73
3.3.3.2. Cálculo de espesor del brazo de CE-1	74
3.3.3.3. Cálculo de espesor del tubo conector de CE-1	74
3.3.3.4. Cálculo de espesor del tubo de prueba.	75
3.3.3.5. Cálculo de espesor de bridas de CE-1	76
3.4. Diseño del deaerador.	77
3.4.1. Dimensionamiento de TM-1.	77
3.4.1.1. Sección de balance.	78
3.4.1.2. Sección de contacto.	79
3.4.1.3. Dimensionamiento de bridas.	86
3.4.2. Selección de material para TM-1.	87
3.4.3. Calculo de espesor de TM-1.	87
3.4.4. Cálculo del espesor de las bridas TM-1.	88
3.5. Diseño de serpentines de enfriamiento.	89
3.5.1. Dimensionamiento de EM-3.	89
3.5.2. Dimensionamiento de EM-1, EM-2 y EM-4.	93
3.6. Especificaciones de bombas.	94
3.6.1. Selección del tipo de bomba.	95
3.6.2. Cálculo de la potencia de la bomba.	97

CAPITULO IV. INSTRUMENTACION Y SISTEMA DE CONTROL	99
4.1. Falla comunes en las calderas.	100
4.2. Sistema proveedor de calor.	101
4.3. Control de nivel	102
4.4. Asegurador del suministro de energía.	103
4.5 Control de la presión.	104
4.6 Control de la conductividad	105
CAPITULO V.- PRUEBAS DE OPERACION	107
5.1 Pruebas metalográficas.	107
5.1.1. Análisis químico cuantitativo.	107
5.1.2. Microdureza.	108
5.1.3. Observación metalográfica.	108
5.2. Prueba neumática.	111
5.3. Prueba hidrostática.	112
5.4 pruebas del sistema de calentamiento.	113
CONCLUSIONES	117
ANEXOS	119
BIBLIOGRAFIA	135

INDICE DE FIGURAS

Número y nombre de la figura.	Página
1.1. El vehículo diseñado por N. Cugnot, una muestra del poder del vapor y la diversidad de sus aplicaciones.	23
1.2. Representación de una caldera.	24
1.3. El calor se transmite desde la parte externa al seno del líquido, el cual alcanza su punto de ebullición con la consecuente producción de vapor.	26
1.4. Esquema de tuberías para el condensado y agua de alimentación de la caldera.	27
1.5. Flujo de los gases a través de los tubos rodeados de agua.	30
1.6. Caldera de tubos de humo de gas natural Cleaver Brooks, Modelo "CB" de 8,000 KW y 250 psig.	30
1.7. Caldera eléctrica Cleaver Brooks, de 9 KW y 132 psig.	32
1.8. Caldera de tubos de humo Kewanee Equipment de capacidad de 3000 KW a 150 psig.	33
1.9. Caldera de tubos de humo Cleaver Brooks, Modelo CB-LE de 7500 KW y 300 psig.	34
1.10. Caldera de tubos de humo prefabricada, de 1500 KW y 100 psig. lista para instalarse.	35
1.11. Caldera de tubos de agua Cleaver Brooks Modelo CB4, 100 KW, 700 psi.	37
1.12. Caldera de tubos de agua Cleaver Brooks modelo FLX, de 200 KW y 500 psig.	38
1.13. Esquema de la circulación en un hogar de polvo de carbón, tipo F, de la Babcock and Wilcox.	39

1.14. Esquema de una caldera acuotubular de tubos rectos inclinados de tambor longitudinal, nótese que la caldera es de tres pasos.	40
1.15. Esquema de una caldera acuotubular vertical de tubos rectos, note que la caldera es de dos pasos.	42
1.16. El número de veces que los gases atraviesan el haz de tubos determina el número de pasos.	43
2.1. Diagrama de flujo de un sistema industrial de generación de vapor.	47
2.2. Diagrama Esquemático de una Caldera para Investigación en Laboratorio	49
2.3. - Zonas características de una caldera industrial	50
2.4. Similitud de las zonas principales de una caldera industrial en el equipo piloto.	51
2.5. Esquema de la zona de precaldera del sistema piloto.	52
2.6. Postcaldera (Zona de deaeración y precalentamiento).	54
2.7. Integración del Sistema Piloto de Generación de Vapor	56
2.8. Diagrama de flujo de proceso, caldera experimental.	56
3.1 Esquematación de las partes principales de la caldera experimental.	68
3.2. Detalle de tubo de prueba y resistencia eléctrica de caldera experimental.	68
3.3. Sección anular del brazo de la caldera.	69
3.4. Dimensiones de caldera experimental	70
3.5. Diagrama de bridas del recipiente CE-1	72
3.6. Secciones del tanque TM-1.	77
3.7. Esquema de la sección de contacto.	79
3.8. Detalle de recipiente TM-1	86
3.9. Diagrama de tapas del recipiente TM-1.	86

4.1. Diagrama de Tubería e instrumentación de caldera experimental.	106
5.1. Microestructura de la soldadura mostrando una base ferrítica homogénea sin defectos.	109
5.2. Microestructura del metal base mostrando una base consistente en martensita revenida sin defectos.	109
5.3. Microestructura de la zona afectada por el calor mostrando una base consistente en perlita-ferrítica homogénea sin defectos.	110

INDICE DE TABLAS

Número y nombre de la tabla.	Página
1.1. Impurezas del agua.	2
1.2. Límites de concentración para agua de caldera.	8
3.1. Características de los tipos de bombas.	95
3.2. Características de las bombas reciprocantes. -	96

INDICE DE GRAFICAS

Número y nombre de la gráfica.	Página.
5.1. Prueba de funcionalidad de caldera experimental, temperatura vs. Tiempo.	116
5.2. Prueba de funcionalidad de caldera experimental, presión en CE-1 vs. Tiempo.	116
5.3. Prueba de funcionalidad de caldera experimental, presión en CE-1 vs. Temperatura.	116

La necesidad de contar con un equipo experimental que simule las condiciones de operación de calderas industriales, a fin de evaluar aditivos para el tratamiento interno de calderas en corto tiempo, y contar con datos representativos que indiquen el comportamiento de los tratamientos químicos en un sistema específico, es la base del presente trabajo.

Se empieza por hablar acerca de las características del agua para generación de vapor, sus tipos de tratamiento (interno y externo) que se le debe de dar para evitar los problemas de incrustación, corrosión, etc., que afectan a los sistemas industriales. También se da, en forma general, algunas propiedades del vapor, su clasificación y usos, así como su importancia dentro de los procesos industriales.

Además, se menciona una clasificación general de las calderas. También se proporcionan algunas características con las que debe contar la caldera piloto a fin de lograr reproducir condiciones similares a la de equipos industriales.

Se establece el diseño de la caldera y los componentes que integran el sistema de generación de vapor, y se proporcionan datos acerca de algunas pruebas realizadas al sistema ya construido a fin de asegurar su operación.

El agua es uno de los fluidos más importantes dentro de los procesos industriales, debido a que algunos de los servicios auxiliares con los que debe contar una planta de proceso (como el vapor), están basados en ella.

Debido a que tiene varias aplicaciones dentro de los procesos industriales, el agua debe cumplir con ciertas características dependiendo del uso que se le vaya a dar.

Dentro de los procesos industriales existe una clasificación del agua;

- Agua de Enfriamiento (baja dureza y bajo contenido de sólidos disueltos).
- Agua para Caldera (Agua desmineralizada).
- Agua de Proceso (Agua desmineralizada y libre de Materia Orgánica).
- Agua de Servicios Generales.

El agua para caldera debe estar al máximo libre de impurezas y de materia orgánica (agua desmineralizada, para generar vapor de mejor calidad y evitar problemas en las calderas.

El vapor dentro de las plantas de proceso es de gran importancia, ya que es utilizado para calentamiento, laminado y procesos industriales y para impulsar turbinas, bombas, compresores y motores recíprocos.

El vapor para procesos industriales es generado a 150 psi o menos, pero para accionamiento de equipo o generación de energía eléctrica requiere tener un mínimo de presión de 600 psi.

El equipo de generación de vapor para cubrir con estas necesidades debe cumplir con ciertas características, a fin de lograr una operación óptima y evitar un mayor costo de operación.

Además, de que a nivel industrial, la necesidad de mejores equipos que mantengan y eficienten la utilización del calor, a fin de preservar las fuentes de combustible limitadas de la tierra, se ha hecho más evidente con la creciente escasez de combustible.

Los operadores, propietarios, fabricantes y personal de mantenimiento e inspección, considerando los factores de un servicio seguro, continuo y confiable, deben de esforzarse para lograr una más eficiente utilización de las calderas, porque en las operaciones industriales actuales, el incremento del costo del combustible minimiza la rentabilidad de una empresa; por otro lado deben de considerar un control más justo en el uso de la energía, tanto técnica como económicamente, por medio de prácticas de mejoramiento operacional y de mantenimiento.

Debido a esto, que los sistemas de generación de vapor, en su operación, requiere que el agua sea tratada a fin de evitar problemas en su funcionamiento.

Esto se logra mediante el tratamiento del agua de repuesto (tratamiento Externo) desde su fuente hasta antes de ser alimentada a la caldera; y con un tratamiento interno (Químico) a fin de contrarrestar las pequeñas cantidades de partículas y oxígeno resultantes del tratamiento externo o por el retorno de condensados.

Este tratamiento se logra por la adición de aditivos que mantienen en suspensión estas partículas y eliminan el oxígeno disuelto en el agua; estos aditivos se aplican además para:

- Lograr mantener limpias las superficies de transferencia de calor (esto es, inhibición y dispersión de los compuestos disueltos en el agua de alimentación a caldera).
- Evitar el consumo excesivo de combustible.
- Asegurar una protección del metal de construcción evitando la corrosión.
- Evitar el arrastre de partículas a los equipos que utilizan vapor.
- Evitar las zonas de sobrecalentamiento y ampollas en calderas.
- Disminuir fallas en la operación, ruptura de tuberías y paros no programados.
- Mantener la seguridad en la operación y evitar riesgos en la planta.

Estos aditivos se encuentran en desarrollo e innovación constante en el mundo, pero en México no se cuenta con un equipo que permita evaluar el desempeño de estos aditivos en calderas de alta presión, por lo que los tratamientos internos que se aplican a calderas industriales no se seleccionan adecuadamente.

Es por ello y debido a la variada calidad del agua que se tiene en las refinerías de PEMEX y a pesar de que aplica estos tratamientos en sus calderas, aún se presentan problemas de incrustación, corrosión, paros no programados, etc.

A todo lo anterior hay que agregarle que las evaluaciones a nivel piloto no se realizan a condiciones semejantes a las industriales, por lo tanto se hace necesario contar con un equipo que simule adecuadamente esas condiciones, para llevar a cabo una adecuada selección de aditivos con el objeto de ofrecer un tratamiento específico para cada caso.

El diseño de una caldera piloto que reproduzca dichas condiciones es la base que sustenta el desarrollo del presente trabajo.

1.1. AGUA.

Las plantas de proceso de tipo químico o petroquímico para su funcionamiento y generación de productos requieren de una serie de fluidos o dispositivos llamados servicios auxiliares los cuales sirven de apoyo durante el procesamiento en dichas instalaciones.

Los servicios auxiliares se dividen en primarios (agua, vapor, combustible, energía eléctrica, desfogue, almacenamiento y mantenimiento) y secundarios (aire de planta e instrumentos, gas inerte, tratamiento de efluentes, edificios y vías de acceso). Los del tipo primario son de vital importancia ya que de no existir no sería posible que las instalaciones operarían satisfactoriamente.

De acuerdo a lo anterior se observa que el agua se requiere en cualquier tipo de proceso a nivel industrial ya que por sus características se emplea para la producción de vapor, enfriamiento, agua de proceso, para combatir incendios, para uso sanitario, mantenimiento y como agua para consumo humano (potable).

1.1.1. CARACTERISTICAS DEL AGUA PARA GENERACION DE VAPOR.

Debido a la aplicación tan variada del agua en el desarrollo de algún proceso determinado, se hace necesario que su calidad difiera conforme a cada una de sus aplicaciones (como agua de proceso o para la generación de servicios auxiliares). Por lo cual dicha calidad depende de la fuente de suministro o abastecimiento del agua, así como de su aplicación dentro del proceso.

Existen varias fuentes de agua, por lo que tiene características diferentes dependiendo de su origen. En la Tabla No. 1.1 se muestran las impurezas más comunes en el agua y los problemas que esta ocasiona.

Tabla 1.1. Impurezas del agua.

Tipo de impurezas	Fórmula o clase	Problema que causa
1. – Alcalinidad a) De sodio (catión H^+ si existe HCO_3^- en igual cantidad). b) De Ca^{++} y Mg^{++}	CO_3^{2-} HCO_3^- OH^- Sólidos disueltos	1. – Espuma en las calderas. 2. – Mal sabor en el agua potable arriba de 400 ppm. 3. – Formación de CO_2 en el vapor lo que causa corrosión en las líneas de retorno. 4. – Arriba de 500-700 ppm en el agua de calderas de baja presión origina: a) Acarreo de sólidos. b) Condensado corrosivo.
2. – Algas, materia orgánica.	Color Sólidos en suspensión y disueltos	1. – Mal aspecto y sabor al agua potable 2. – Mancha el papel, telas u otros textiles
3. – Aluminio.	Al^{3+} Sólidos disueltos	1. – Forma parte de la dureza 2. – Muy perjudicial para calderas de alta presión, por formar con la sílice, incrustaciones de silicoaluminato de calcio.
4. – Anhídrido carbónico.	CO_2 Gases disueltos	1. – Causa corrosión sobre todo en las líneas de condensado
5. – Aceites y Grasas.	Coloide	1. – Causa corrosión al descomponerse en las calderas en glicerina y ácidos grasos 2. – Forma espuma en las calderas, originando arrastre 3. – Forma películas aislantes que impiden la transferencia de calor.
6. – Acidez o bajo pH.	Solamente existe en aguas industriales o de minas	1. – Corrosión 2. – No adecuada para beber

Tabla 1.1. Impurezas del agua. (Continuación).

Tipo de impurezas	Formula o clase	Problema que causa
7. - Acido Sulfhídrico.	H ₂ S Gases disueltos.	1. - Corrosión. 2. - Da mal olor y sabor al agua.
8. - Anión cloruro.	Cl ⁻ Sólidos disueltos.	1. - Produce un sabor salado al encontrarse presente en grandes cantidades. 2. - Corrosión en equipos de acero inoxidable.
9- Dureza.	Todas las sales de Ca y Mg tales como: Ca(HCO ₃) ₂ , CaSO ₄ , CaCl ₂ , Mg(HCO ₃) ₂ , MgSO ₄ , MgCl ₂ Sólidos disueltos.	1. - Forma escamas en las calderas. 2. - Depósitos generalmente cuando se calienta. 3. - Destruye el jabón y forma grumos. 4. -Destruye los detergentes y tuberías.
10. - Fluoruros.	F ⁻ Sólidos disueltos.	1. - Afecta al esmalte dental (arriba de 1 ppm). 2. - No afecta a los procesos industriales.
11. - Hierro y manganeso.	FE ²⁺ , Mn ²⁺ Sólidos disueltos Coloide Sólidos en suspensión.	1. - Da al agua sabor astringente. 2. - En tuberías causa obstrucciones. 3. - Manchas de óxidos en porcelana y otros productos.
12. - Nitratos. (es rara su presencia).	NO ₃ ⁻ Sólidos disueltos.	1. - Causa daños en la sangre. 2. - No causa daño en la industria.
13. - Nitritos.	NO ₂ ⁻ Sólidos disueltos.	1. - En pequeñas cantidades afecta la potabilidad del agua. 2. - El producto en sí es venenoso.

Tabla 1.1. Impurezas del agua. (Continuación).

Tipo de impurezas	Formula o clase	Problema que causa
14. – Radioactividad.	Provocada por algunos elementos y gases radioactivos.	1. - Se supone que en cantidades apreciables pueden causar cancer. 2. - En cantidades mínimas se consideran aguas medicinales.
15. – Sílice.	SiO ₂ Sólidos disueltos.	1. - Incrustaciones durísimas en las calderas (silicato de calcio). 2. – Depósitos en los alabes de las turbinas.
16. – Sodio y potasio.	Na ⁺ , K ⁺ Sólidos disueltos.	1. - Afectan el agua potable. 2. - Debido a su gran solubilidad no afecta los procesos industriales.
17. – Sulfatos.	SO ₄ ²⁻ Sólidos disueltos.	1. – Causan incrustaciones duras en las calderas si hay cationes de Ca y Mg. 2. – Causan sabor amargo y efecto de purgantes si está presente en grandes cantidades.
18. – Turbidez.	Sólidos disueltos.	1. – Ocasiona depósitos. 2. – Causa que se ensucie el papel, telas u otros textiles.
19. – Oxígeno.	O ₂ Gas disuelto.	1. – Corrosión.

Es por ello que para la generación de vapor el agua debe de tener ciertas características que cumplan con los requerimientos de calidad para su aplicación.

1.1.2. CLASIFICACION DEL AGUA.

La clasificación del agua va a diferir si es dada en función de la fuente de abastecimiento o suministro o bien depende del empleo que se la vaya a dar en las plantas de proceso.

1.1.2.1. CLASIFICACION DEL AGUA POR SU ORIGEN.

- A) Aguas Superficiales
 - 1) Mar
 - 2) Ríos
 - 3) Embalses
 - 4) Lagos Naturales
- B) Aguas Subterráneas
 - 1) Pozos Profundos
 - 2) Manantiales
 - 3) Filtraciones subterráneas.

Aguas superficiales.- Por lo general las instalaciones de proceso dependen de abastecimientos superficiales, ya que en su mayoría representan una fuente de suministro segura, ya que son de una extensión considerable para cubrir los requerimientos dentro de las plantas. Y entre ellas se encuentran: agua de mar, agua de ríos, agua de lagos naturales y embalses.

Aguas subterráneas.- Este tipo de abastecimiento es utilizado cuando no hay disponibilidad de una fuente superficial, ya que existen limitaciones en los volúmenes de acuíferos. Un inconveniente en las aguas subterráneas es su tendencia a contener una excesiva dureza, lo cual se debe a que los constituyentes que causan la dureza son lavados de los depósitos minerales. Por otro lado, el abastecimiento subterráneo tiene la ventaja de proporcionar

aguas que requieren un menor grado de tratamiento por que las "impurezas" se eliminan en forma natural a medida que atraviesa las capas del suelo y el subsuelo. Y entre ellas se encuentran: pozos profundos, manantiales y filtraciones subterráneas.

1.1.2.2. CLASIFICACION DEL AGUA POR SU APLICACIÓN.

- A) Para uso municipal o agua potable
- B) Para usos industriales
 - 1) Agua de enfriamiento
 - 2) Agua para proceso
 - 3) Agua para usos generales
 - 4) Agua para calderas

Agua para uso municipal o agua potable.- Es un tipo muy especial de agua, que de acuerdo al uso que se le da, debe de cumplir con características como son: libre de sólidos en suspensión, baja dureza, cierto contenido de minerales y libre de bacterias y microorganismos (agua clorada) lo que le infiere la característica de ser potable.

Agua para usos industriales.- Por el servicio que presta el agua dentro de las plantas de proceso, esta podrá ser de características variables, dependiendo en donde intervenga este tipo de agua, así podemos diferenciar 4 tipos diferentes, que se detallan a continuación:

Agua de enfriamiento.- Es aquella que se utiliza en los distintos sistemas de enfriamiento, siendo en una planta la de mayor uso.

Agua para proceso.- El agua para proceso en algunos casos, solo se requiere que sea limpia, clara y libre de materia orgánica, y es cuando no tiene una relación directa o bien no está en contacto con la materia prima o productos durante un lapso de tiempo considerable. En cambio si se mezclara en el proceso se hace indispensable que el agua sea lo más pura posible recomendándose del tipo desmineralizada.

Agua para usos generales.- Dentro de este tipo de agua se engloban la de uso sanitario, servicios, y contra incendio, debiendo cumplir con una calidad bacteriológica adecuada, además de estar libre de olores y sabores desagradables.

El tipo de agua que nos interesa en esta ocasión es para usarse en calderas, por lo que hablaremos de los requerimientos que debe cumplir para su aplicación.

1.1.3. AGUA PARA CALDERAS.

El agua sirve como medio de generación de vapor dentro de los equipos conocidos con el nombre de calderas, los cuales requieren de un agua de alimentación de alta pureza (agua desmineralizada), debido a que al evaporarse está, la concentración de las impurezas se incrementa, ocasionando deterioros en los materiales de calderas, e ineficiencias en la operación de las mismas.

1.1.4. CALIDADES REQUERIDAS DEL AGUA PARA GENERACION DE VAPOR.

La Asociación Americana de Fabricantes de Calderas, ha establecido los límites de concentración de sólidos, alcalinidad y sílice en el agua empleada para la generación de vapor, los cuales se indican en la tabla No. 1.2.

Tabla 1.2., Límites de concentración para agua de caldera.

Presión de la Caldera (psig)	Sólidos Totales (ppm)	Alcalinidad (ppm)	Sólidos Suspendedos (ppm)	Sílice como SiO ₂ (ppm)
0-300	3500	700	300	120
301-450	3000	600	250	80
451-600	2500	500	150	50
601-750	2000	400	100	30
751-900	1500	300	60	20
901-1000	1250	250	40	10
1001-1500	1000	200	20	5
1501-2000	750	150	10	1.5
2000 y mayores	500	100	5	0.7

1.1.5. TRATAMIENTO DEL AGUA DE ALIMENTACION DE GENERADORES DE VAPOR.

TRATAMIENTO EXTERNO.- Es aquel que se efectúa fuera de la caldera. El agua que se trata, se conoce con el nombre de "agua de repuesto" (Make - up) y es aquella que es necesario alimentar a la caldera para compensar las pérdidas debidas al uso de vapor libre y otras causas. La cantidad de agua de repuesto está en función de la cantidad de agua evaporada, el retorno de condensados y de las purgas de las caldera.

TRATAMIENTO INTERNO.- Se caracteriza por efectuarse dentro de la caldera, con la finalidad de contrarrestar el efecto que pudieran tener pequeñas cantidades de dureza y oxígeno resultante del tratamiento externo o introducidas por el retorno de condensados, y consiste en la adición de ciertas sustancias como dispersantes, inhibidores de corrosión y ajustadores de pH.

Hay pocos manantiales para la alimentación de calderas, cuya agua no muestre cierta dureza, incluso la de los lagos naturales. El agua de pozos profundos suele ser mucho más dura que la de río o lago, debido a las sales disueltas. El agua blanda, como la calificada ordinariamente como potable, por lo general es dura para la alimentación de calderas. Prácticamente todas las aguas naturales son duras y contienen sustancias capaces de formar incrustaciones, generalmente sales solubles de calcio y magnesio, invisibles a simple vista. No se pueden quitar por filtrado y a menos que se eliminen, se depositarán en forma de lodo o de incrustación, y este es un punto muy importante por dos razones:

1. La acumulación de incrustaciones provoca mayor temperatura en la superficie de los tubos y perjudica a las paredes de los mismos.
2. La disminución de la sección de paso de los tubos para el agua origina pérdidas de carga por rozamiento y circulación defectuosa en la caldera.

Por dureza del agua nos referimos al contenido de carbonato de calcio CaCO_3 incluyendo las convenientes equivalencias a los otros compuestos de calcio y magnesio que pudiera haber. La dureza se expresa en número de miligramos de carbonato de calcio presentes e un litro de agua (ppm). El hecho de que un agua sea blanda, por ejemplo, que en el análisis de 1 a 2 ppm de dureza, no significa que no sea capaz de formar lodos o incrustaciones. Como en una caldera se concentran las sales por evaporación, es factible llegar a la concentración de 10 ppm y generar problemas de incrustación y lodos.

1.1.5.1. OBJETO DEL TRATAMIENTO DEL AGUA DE ALIMENTACION DE CALDERAS.

Antes de exponer los diversos procedimientos industriales existentes para tratar el agua, conviene especificar los fines que se persiguen con tal tratamiento. Los fines básicos son:

1. - Eliminación de las incrustaciones sobre las superficies de calefacción de la caldera y de sus accesorios.
2. - Eliminación de la corrosión bajo depósito.
3. - Supresión de los "arrastres" para evitar los depósitos en los tubos de sobrecalentamiento y álabes de las turbinas.

Con respecto al primer punto, una capa de incrustaciones reduce la transmisión de calor y simultáneamente eleva la temperatura de las paredes metálicas. También tenemos el inconveniente de la reducción de sección en los tubos. Cuando la temperatura del material de estos llega alrededor de los 500 °C, hay un serio peligro de recalentamiento y de explosión de la caldera.

Con respecto al segundo punto, eliminar la corrosión va unido a la eliminación del oxígeno y del ácido carbónico disuelto en el agua de alimentación a la caldera. La principal defensa contra la corrosión por el oxígeno, consiste en deaerear por completo el agua de alimentación. Si quedasen trazas de oxígeno todavía se suelen eliminar añadiendo secuestrantes de oxígeno (p. e. sulfito de sodio, metil etil cetoxina, "mekor", etc.). También es necesario el mantener la concentración de iones hidrónico (pH) convenientemente en el agua de la caldera.

El tratamiento químico del agua deja en esta un pequeño exceso de sosa, que da un valor relativamente elevado al pH, generalmente superior a 9, y se ha observado que con este valor, la ligera alcalinidad reduce sensiblemente la tendencia a la corrosión.

Refiriéndonos al tercer objetivo, la eliminación de los arrastres por el vapor (líquido y sólidos), limita la totalidad de sólidos presentes en la caldera por una purga continua y por la graduación de la alcalinidad.

Teóricamente se ha dicho que una parte de la sílice en el agua de caldera se vaporiza, particularmente a presiones de caldera de 49 Kg/cm² y superiores y que pasa en esta forma con el vapor a la turbina precipitándose posteriormente sobre las paletas en los escalones de baja presión y temperatura.

Hace algunos años, Straud encontró, que la proporción entre sulfato de sodio y el carbonato de sodio, según la presión de funcionamiento, puede influir entre en la generación de turbulencias y arrastres.

1.1.5.2. METODOS PARA EL TRATAMIENTO DEL AGUA PARA GENERACION DE VAPOR.

Han tenido éxito los siguientes métodos para el tratamiento del agua de alimentación:

1. - Clarificadores.
2. - Filtración.
3. - Depuración o ablandamiento
 - I. Depuración en frío.
 - a) Depuración con cal y sosa.
 - b) Corrección con fosfatos.
 - c) Corrección con permutita sódica.
 - II. Depuración en caliente.
 - III. Depuración con permutitas.
 - a) Permutita de sodio.
 - b) Permutita de hidrógeno.
4. - Evaporadores.
5. - Deaeradores.

Clarificación.- La clarificación remueve los sólidos suspendidos del agua de coagulación y floculación. Los aglomerados contenidos en el agua pueden ser acelerados (precipitados) por floculación con la adición de sílica activada y apropiados polielectrolitos que conectan partículas para la formación de polímeros en cadena.

Filtración.- Es la remoción de la materia suspendida en el agua por acción de un medio filtrante. Existe un gran número de tipos de filtros empleados en la industria, el más usual es el constituido por un lecho empacado de partículas sólidas, usualmente arena y grava y para requerimientos especiales se suele emplear la antracita.

Depuración o ablandamiento.- Es un proceso que consiste en remover del agua ciertas sustancias minerales, que son las que causan la dureza en el agua, principalmente los compuestos de calcio y magnesio. Estas sales comúnmente son las responsables de depósitos en calderas y sistemas de enfriamiento. Un camino para remover la dureza es por medio de la disminución de la solubilidad de estos compuestos.

Depuración en frío.-

Depuración con cal y sosa.- El proceso de depuración en frío con cal y sosa consiste en la adición, en correcta proporción, de sosa (carbonato sódico) y cal (hidrato cálcico) al agua fría.

En las instalaciones más modernas de mayor capacidad se emplea por lo general un tanque de reacción con un agitador o impulsor de pastas, tubos de descarga y compartimentos de concentración de lodos que trabajan según el principio de contacto de lodos.

Para la depuración en caliente se usan los mismos productos químicos que en la depuración en frío, pero todo el tratamiento se realiza cerca del punto de ebullición. Las ventajas de este procedimiento son que el equipo es menos voluminoso y que la dureza del agua se disminuye considerablemente. Todo se basa en el hecho de que CO_3Ca y el $\text{Mg}(\text{OH})_2$ son ligeramente solubles. La

reacción química es unas ocho veces más rápida a la temperatura de ebullición que en frío; evidentemente, el proceso en caliente es más económico en tiempo y en capacidad del equipo. De igual manera, los tanques de precipitación deben ser de menor tamaño, puesto que el precipitado, que está finamente dividido cuando se hace en frío, en caliente es más grueso y se deposita más pronto.

Corrección con fosfatos.- Los fosfatos se usan en tratamiento directo, o como auxiliar en las depuraciones con cal y sosa, en frío o en caliente. Se pueden llevar directamente a la aspiración de las bombas de alimentación, en forma de monofosfato o de metafosfato, pues ambas tienen propiedades alcalinorreductoras y convierten la dureza residual del proceso en caliente en un precipitado no adherente y fácil de eliminar.

Corrección con permutita sódica.- Con los nombres de "permutitas" se designan ciertos compuestos minerales que tienen la propiedad de intercambiar las bases. Cuando entra en contacto un agua dura con la permutita sódica, ésta cambia su base sódica por las cálcicas o magnésicas contenidas en el agua. Mientras que la expresión permutita se aplicó originalmente a minerales de origen natural, tales como la glauconita, en la actualidad se ha convertido en una expresión más o menos genérica aplicable a una gran cantidad de materiales de intercambio, tales como silicatos dobles hidratados de origen artificial, carbonos sulfonados y materias resinosas que poseen las propiedades de cambio deseadas y capaces de una regeneración y extracción repetida.

Cuando el agua tiene un alto contenido de bicarbonatos, puede usarse el tratamiento combinado, primero con cal y luego con permutita.

Debe notarse que la depuración mediante permutita no reduce el contenido de sílice del agua tratada.

Depuración en caliente.-

Cal-sosa caliente y permutita caliente.- En este proceso el agua dura pasa primeramente a través de un depurador en caliente en el que mediante tratamiento con cal hidratada o cal dolomítica se reduce la alcalinidad, se reduce la sílice y parte de la dureza es eliminada. La mayor parte de la dureza del carbonato es eliminada y con ello se reduce la alcalinidad obteniéndose una reducción efectiva de sílice. El agua que sale pasa a un depurador de permutita lleno con una resina de estireno que resistirá la acción del agua caliente con un elevado pH. El proceso de esta segunda fase elimina todo el calcio y magnesio residuales. Por lo general se interponen filtros entre el depurador de cal, sosa y el de permutita.

Tratamiento del agua por desmineralización.- Para este proceso generalmente se utilizan resinas de intercambio iónico que se encargan de remover los iones no deseables en el agua por el reemplazo con un número equivalente. El cambiador de cationes (o resina catiónica) regenerado por ácido cuando trabaja basándose en el intercambio total de hidrógeno, cambia el hidrógeno por calcio, magnesio y sodio, presentes en el agua que lo atraviesa. Como resultado, el agua saliente contiene ácido carbónico, equivalente en cantidad a los carbonatos o bicarbonatos de calcio, magnesio y sodio que queden libres al deaerarse, y se forma ácido sulfúrico y clorhídrico aproximadamente equivalente en cantidad a los sulfatos o cloruros de calcio, magnesio y sodio que originariamente se hallaban presentes en el agua.

El absorbedor de aniones regenerado por sosa cáustica absorbe los ácidos sulfúricos y clorhídricos en el agua saliente del cambiador de cationes regenerados por ácido, produciendo un agua neutra prácticamente libre de sólidos disueltos. Con un material adecuado para el cambio de aniones, la sílice también puede reducirse a una pequeñísima fracción. El agua suministrada a este aparato debe estar libre de suciedad o de materias en suspensión y la capacidad de la instalación se basa en el tratamiento de agua de determinadas características.

Evaporadores o destiladores.- El uso de evaporadores está justificado en algunos casos, cuando el porcentaje del agua de alimentación a tratar es pequeño (del 1 al 4%).

Deaeradores.- Los gases que predominan en el agua y que se tratan con este método son O_2 y CO_2 . Junto con H_2S y NH_3 su eliminación se basa en la elevación de la temperatura del agua hasta su punto de saturación, para la presión que se tenga, para quitar el oxígeno del agua se cuenta con dos tipos de deaeradores: deaeradores de vapor y deaeradores a vacío.

En los deaeradores de vapor con el agua espreada o en película el vapor logra la desgasificación, se reduce el O_2 hasta 0.005 cc/lt. El deaerador típico tiene secciones de calentamiento, aereación y almacenamiento; el diseño puede ser de platos o espreas, o una combinación de ellos y el flujo puede ser cruzado a contra corriente o en paralelo u la mezcla de gases incondensables se hace descargar por un venteo o desfogue.

Los deaeradores a vacío se caracterizan por emplear eyectores con chorro de vapor o bombas mecánicas de vacío para conseguir la presión de vacío necesario, que depende de la temperatura del agua y la presión de vacío normalmente tiene un valor de 29 in de Hg y su eficiencia, comparada con las unidades que operan con vapor, es mucho menor.

1.2. - VAPOR.

El vapor es uno de los servicios auxiliares más importantes y necesarios para las plantas de proceso, ya que tiene varios usos y aplicaciones dentro de las mismas, como fluido de calentamiento, para la generación de energía eléctrica, etc.

1.2.1. - Usos y Aplicaciones.

En los procesos industriales el vapor tiene varias aplicaciones. Debido a las grandes cantidades de calor necesarias para evaporar el agua, el vapor lleva consigo grandes cantidades de energía y potencia, las cuales se pueden liberar o usar en muchos otros procesos además de la simple transferencia de calor. Algunos de estos procesos son:

- Procesamiento de alimentos. (Lácteos, cárnica, jugos, conservas).
- Aplicaciones en el empaque de productos. (Esterilización, lavado, etc.).
- Producción y lavado de textiles. (Lavado en seco, lavado y presurización).
- Procesos agroindustriales. (Invernaderos, lavado y secado).
- Procesos de manufactura. (Plásticos, equipo activado por vapor, papel).
- Procesos petroquímicos.
- Generación de energía mecánica y eléctrica.

Las tres categorías generales del uso de vapor en plantas de proceso son:

- a) **Cargas de calefacción o calentamiento**, el cual se recupera normalmente como condensados.
- b) **"Proceso" o carga abierta**. El cual normalmente no es recuperado a menos que el sistema de vapor este implicado.
- c) **Carga de poder o potencia** (principalmente turbina) que pueden ser condensados, contrapresionados, o es extraído atmosféricamente.

1.2.2. - Propiedades y características del Vapor.

Mientras el uso del vapor para confort esta disminuyendo, su valor como medio de obtención de calor para usos industriales, va en aumento debido a sus muchas propiedades únicas, algunas de las cuales se enlistan a continuación:

- El vapor fluye por el sistema de tuberías sin necesidad de sistemas de bombeo.
- Debido a su baja densidad el vapor se puede usar en edificios altos donde los sistemas de agua crearían cargas de presión muy altas.
- Los usuarios de un sistema de vapor se pueden agregar o remover sin grandes cambios en el diseño básico.
- Los componentes de la red de suministro de vapor se pueden reparar o remplazar con solo cerrar la válvula del suministro de vapor y sin el problema de drenar o purgar agua del sistema.
- La mayoría del calor contenido en el vapor se almacena como calor latente, el cual permite que se transmitan grandes cantidades de calor eficientemente con pequeños cambios de temperatura.

En vista de las ventajas antes mencionadas, el vapor es lo más recomendable en las siguientes situaciones:

- Donde se requiere calor para procesos y acondicionamiento tales como en plantas industriales, hospitales, restaurantes, plantas de lavado en seco, lavanderías y edificios comerciales.

CAPITULO I

- Donde el medio de calentamiento deba viajar grandes distancias, o donde la altura del edificio pudiera producir una presión excesiva en el sistema de bombeo.
- Donde ocurran cambios intermitentes en la carga de calor necesaria.

En instalaciones comerciales e industriales, el diseño sistemático y cuidadoso de un sistema de vapor puede lograr el costo de instalación y/o el consumo de energía más bajos.

Las calderas se pueden construir en casi todas las formas y arreglos de hornos y tubos de caldera, para quemar casi toda clase de combustibles, de tiro natural o tiro forzado, de hierro fundido, acero, cobre o combinaciones de estos metales.

El vapor es singularmente adaptable, por su disponibilidad y sus ventajosas características, al uso en procesos industriales y de calentamiento y en ciclos de potencia.

El primer paso en el diseño de un equipo de generación de vapor, para generación de energía o transferencia de calor o ambos es establecer información confiable sobre las propiedades del vapor.

Las propiedades del vapor necesarias para el diseño de un equipo de generación de vapor están dadas en las tablas de vapor (ver Código ASME sec. I). Estas propiedades incluyen la temperatura de saturación correspondiente a varias presiones, las entalpías (anteriormente llamada contenido de calor) del agua, la evaporación y el vapor, y los volúmenes específicos del agua y el vapor, todas a varias presiones y temperaturas.

En las tablas del vapor también se incluyen las propiedades intensivas de volumen específico, entalpía específica, y entropía específica para cierta temperatura, presión y estado (líquido o vapor) determinado.

Estas son las propiedades termodinámicas y estados requeridos para la solución numérica para diseñar y resolver problemas que involucran al vapor, ya sea para transferencia de calor o generación de energía.

1.2.3. - Termodinámica del Vapor.

La termodinámica es la ciencia concerniente con la conservación de energía y las reglas que gobiernan los cambios de energía en formas transitorias; llamadas, calor y trabajo.

El proceso de ebullición del agua para hacer vapor es un fenómeno familiar. Termodinámicamente, la ebullición es el resultado de un caso especial de adición de calor a la sustancia de trabajo, agua, en un proceso a presión o temperatura constante. El calor que tiene que ser suministrado para cambiar el agua en vapor sin elevar su temperatura es llamado calor de evaporación o vaporización.

El punto de ebullición de un líquido puede ser definido como la temperatura a la cual su presión de vapor es igual a la presión total por encima de su superficie libre. Esta temperatura es también llamada temperatura de saturación.

El término "punto de ebullición" es frecuentemente usado para identificar condiciones a presión atmosférica estándar. Sin embargo, el punto de ebullición o temperatura de saturación es en realidad una función de la presión y se eleva cuando la presión se incrementa.

La generación de vapor en un recipiente cerrado resulta en un incremento en la presión debido a un incremento del volumen específico siguiendo un cambio de fase de líquido a gas. Al mismo tiempo la temperatura del agua y del vapor generado incrementa. En la operación de calderas por debajo del punto crítico, la presión es normalmente fijado a un valor deseado para mantener un nivel de agua con un espacio de vapor arriba de ella, y regulando la

CAPITULO I

generación de vapor para balancear el flujo de vapor deseado por la caldera.

El vapor siempre está presente sobre una superficie libre de agua, aún en presencia de aire u otros gases no condensables.

Las mezclas de vapor y agua en ausencia de una superficie libre también son comunes en donde las dos fases fluyen juntas en un tubo u otro canal de flujo. La fracción peso o porcentaje de vapor en tal mezcla es conocida como la calidad de vapor. Si una superficie libre existe bajo condiciones de flujo, tal como flujo separado o circular en un tubo, el término calidad es aún usado para describir la fracción de vapor resultante.

1.2.4. - Clasificación del Vapor.

Debido a sus características y propiedades, el vapor tiene aplicaciones muy importantes a nivel industrial y dada esta importancia por lo general se clasifica al vapor en función del grado de sobrecalentamiento y de la presión.

1.2.4.1. Clasificación del vapor en función del grado de sobrecalentamiento.

Se entiende como temperatura de saturación de un líquido como aquella en la cual su presión de vapor es igual a la presión total sobre su superficie libre.

A) Vapor saturado.- Se dice que un vapor está saturado cuando el vapor se encuentra a la temperatura de saturación que le corresponde a esa presión.

B) Vapor sobrecalentado.- Cuando a un vapor saturado libre de agua se le adiciona calor y este eleva su temperatura como consecuencia de la adición del calor, se dice que el vapor es sobrecalentado.

1.2.4.2. Clasificación del vapor en función de la presión.

Esta clasificación está asociada a la aplicación de cada vapor y muchos autores la hacen corresponder con la clasificación de las calderas en función de la presión, también es cierto que muchos autores se contradicen en cuanto al rango de presión que corresponde a cada clase de vapor, aquí se presenta la que parece la más utilizada.

- A) Vapor de baja presión.
- B) Vapor de media presión.
- C) Vapor de alta presión.
- D) Vapor a presiones supercríticas.

Vapor de baja presión.- Este vapor generalmente se utiliza para servicios de calefacción o calentamiento. Las presiones de este vapor no rebasan las 15 psi.

Vapor de media presión.- Este vapor generalmente se aplica a proceso y las presiones son mayores de 15 psi y menores o iguales a 800 psi.

Vapor de alta presión.- Este vapor generalmente se aplica para la generación de potencia o energía mecánica (turbinas), y las presiones son mayores de 800 psi y menores o iguales a 2500 psi. ($P_c = 3,208.2$ psia $T_c = 705.5$ F).

Vapor a presiones supercríticas.- La generación de esta clase de vapor está restringido a aplicaciones industriales a gran escala y generalmente las presiones de operación son entre 3500 y 5000 psi.

1.3 BREVE HISTORIA DE LAS CALDERAS.

- Los griegos diseñaron calentadores de agua a los que podríamos llamar los antecesores de la caldera.
- Las primeras calderas fueron recuperadas de las ruinas de Pompeya, estas eran rústicas y de poca capacidad.
- En 1679 el francés Denis Papin desarrolló la primera embarcación impulsada por vapor de agua.
- En 1698, Thomas Savery desarrolló un aparato de vapor para bombear agua. El vapor se condensaba y se creaba un vacío causando que el agua se aspirara dentro de un cilindro.
- En 1769, el francés Nicolás Cugnot utilizó la fuerza del vapor de agua para propulsar un triciclo construido de madera, el que llevaba en la parte delantera una imponente caldera de doble pared (lo que se considera el primer automóvil, este diseño se encuentra esquematizado en la figura 1.3, en donde es fácil distinguir la caldera de doble pared).
- Las calderas se continuaron refinando y desarrollando para usarse posteriormente en la Revolución Industrial.

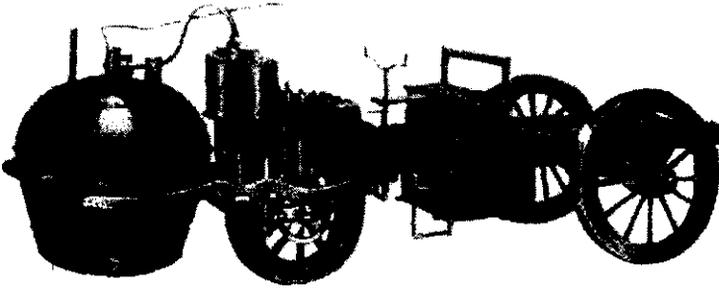


Figura 1.1.- El vehículo diseñado por N. Cugnot, una muestra del poder del vapor y la diversidad de sus aplicaciones.

1.4.- GENERADORES DE VAPOR.

Los generadores de vapor son equipos diseñados para convertir la energía potencial del combustible en energía calorífica la cual es entonces transferida al un fluido contenido dentro del mismo generador de vapor (p. e. Dowtherm® o mercurio) para algun objetivo específico.

Si el fluido, al cual se le transfiere calor, es agua, al equipo se le conoce como caldera y el término de generador de vapor se aplica cuando el fluido no es agua.

Los generadores de vapor por lo general se utilizan cuando las necesidades energéticas ameritan el alto costo de construcción, ya que por lo general trabajan a altas presiones y temperaturas.

1.5. - LA CALDERA DE VAPOR.

El término caldera se aplica a un dispositivo que genera vapor de agua para fuerza, procesos industriales o calefacción y que transmite calor procedente de una fuente externa (generalmente combustión) al fluido que contiene para poder vaporizarlo, en pocas palabras, una caldera es un recipiente metálico, cerrado y con agua en su interior, la cual se calienta hasta su temperatura de ebullición para producir el vapor que se usará en otras aplicaciones. En la Figura 1.1. se encuentra el icono representativo de las calderas, con el cual se representa a una caldera en un diagrama de flujo de proceso.

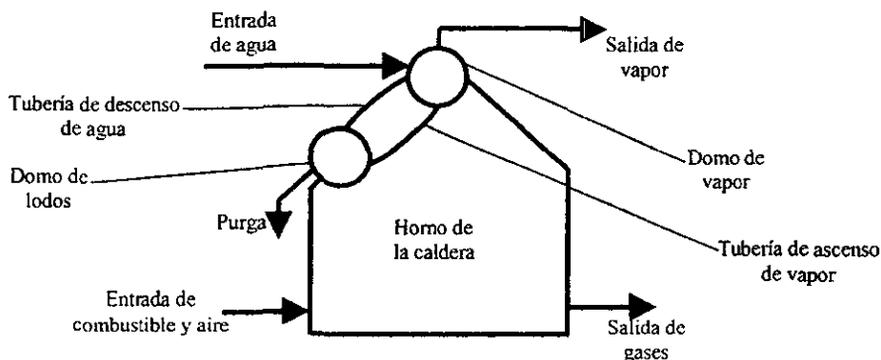


Figura 1.2. Representación de una caldera.

En este esquema, se encuentran representados los principales componentes de una caldera, los cuales son:

1. Alimentación de la caldera
2. Salida de vapor.
3. Domo de lodos.
4. Domo de vapor.
5. Cavidad del horno.
6. Tubos de Ascenso del Vapor.
7. Tubos de Descenso del Agua.
8. Purga.

Independientemente de la forma, de la capacidad, de las condiciones de operación o del material con que haya sido hecha la caldera, siempre estará conformada por los componentes ya mencionados. Por supuesto, las calderas industriales son más complejas de lo que el concepto de un recipiente metálico, cerrado y con agua nos puede dar, recordemos que siempre se busca la producción de vapor de la manera más eficiente, lo que implica que una caldera industrial estará equipada con dispositivos variados, poseerá variadas formas y tendrá un complejo sistema de control que garantizará un adecuado funcionamiento.

Probablemente hubo un tiempo en el que era relativamente sencillo diseñar una caldera, pero ahora las necesidades se han hecho cada vez más específicas. Y el problema de esto es que: **Una caldera es tan buena como el sistema y el agua que se ponga en ella.**

Otro aspecto importante a considerar es que: **Nadie adquiere una caldera a menos que su adquisición garantice una fuente de vapor consistente y confiable.**

Para satisfacer estas dos premisas es necesario poseer sólidos conocimientos en sistemas de producción de vapor para el diseño de cualquier caldera.

Es por ello que comenzaremos por determinar los tres elementos para el funcionamiento de una caldera, los cuales son: Calor, agua, y un medio a través del cual se transmita el calor, con estos elementos se puede producir vapor de agua, pero esto no es suficiente, además se debe producir el vapor de la manera más eficiente posible; estos tres elementos se encuentran representados en la figura 1.2, el agua contenida en un recipiente (medio de transferencia de calor), absorbe calor para elevar su temperatura hasta su punto de ebullición (calor sensible) y posteriormente absorbe más calor (calor latente) para transformarse en vapor de agua.

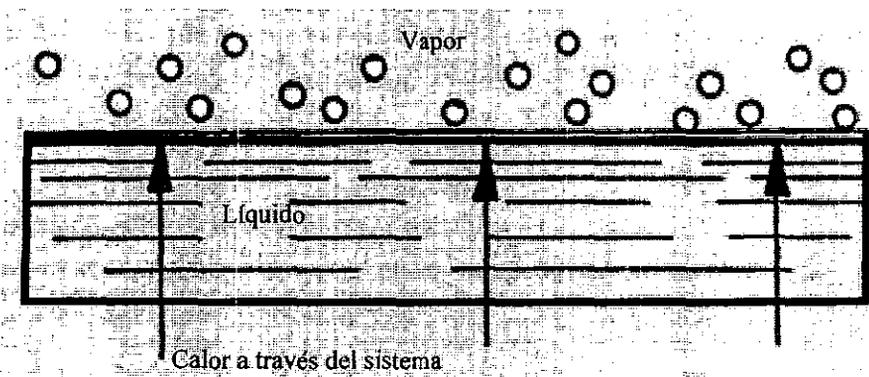


Figura 1.3. El calor se transmite desde la parte externa al seno del líquido, el cual alcanza su punto de ebullición con la consecuente producción de vapor.

Es imposible que todos estos elementos interactúen química y físicamente en un balance perfecto que produzca una eficiencia de 100% de manera sostenible, es por ello que la comprensión de los papeles que desempeñan estos 3 elementos ayudarán a analizar los problemas del cliente y sugerir diseños apropiados.

1.6. - SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN.

El sistema de distribución consiste en:

- Red de tubería de suministro.
- Red de tubería para el retorno de condensados.

Dicho sistema se encarga de distribuir el vapor, recolectar los condensados y remover el aire y gases no condensables que se encuentren en el sistema de producción de vapor. En estos sistemas, es importante que la tubería sea capaz de distribuir el vapor, no solamente a cargas completas (al 100%), sino además de cargas parciales y en exceso que pudieran ocurrir en la operación

Además, los usuarios de un sistema de vapor pueden ser una gran cantidad y variedad de equipos, de los cuales la mayoría están diseñados para el uso de vapor de baja presión, los que utilizan vapor de alta presión tiene una construcción más pesada aunque en apariencia son similares a los de baja presión.

1.7. - SISTEMAS ABIERTOS.

Un sistema abierto se define como aquel que tiene una o varias salidas de vapor, que no retornan al sistema y que por lo tanto no forman un ciclo cerrado de vaporización y condensación.

Esta definición es fundamental para comprender la importancia del equipo necesario para el tratamiento del agua de repuesto, el que permite una adecuada operación y mantenimiento del mismo sistema. A medida que el agua, la cual lleva calor en forma de vapor, se escapa a la atmósfera por medio de pérdidas, se debe reponer al sistema para mantenerlo a régimen permanente, pero evitando introducir al seno de la caldera las impurezas que el agua de repuesto trae consigo.

La temperatura y la calidad del agua de repuesto tienen un dramático efecto en la eficiencia del sistema en su conjunto, de ahí la importancia del equipo que dará tratamiento al agua de repuesto de la caldera.

Es recomendable que cuando se trate con sistemas de vapor asegurarse de conocer la forma en que opera y como se distribuye el vapor en el proceso.

1.8. CLASIFICACION DE LAS CALDERAS.

Existen varias clasificaciones de calderas, en este capítulo solo se incluyen las más relevantes. Las calderas reciben las denominaciones de estacionarias (las instaladas en tierra) y las móviles (para navíos y locomotoras) según la aplicación que requiera el servicio de vapor.

Las calderas **estacionarias** se utilizan para calefacción de edificios, para plantas de calefacción central de servicio público, como plantas de vapor para procesos industriales, como plantas de vapor para centrales termoeléctricas locales, como centrales de fuerza para servicio público (plantas termoeléctricas) o unidades generadoras para servicios especiales.

Las calderas **móviles** incluyen: las de tipo locomovil usadas en los campos petroleros y en los aserraderos, los generadores de vapor pequeños y las que se utilizan para malacates de vapor, tan familiarizados con las obras de construcción.

Por lo general a las calderas se les clasifica en dos principales tipos, las calderas de tubos de humo y las calderas acuotubulares (esta nomenclatura se refiere al fluido que contienen los tubos).

En una **caldera de tubos de humo** (pirotubular), los productos de combustión son conducidos a la chimenea de la caldera a través de los tubos (que están rodeados por agua, como se ejemplifica en el esquema de la fig. 1.5.) cierto número de veces (lo que indica el número de pasos, en la Fig. 1.6. se puede apreciar una caldera típica de tubos de humo de 2 pasos).

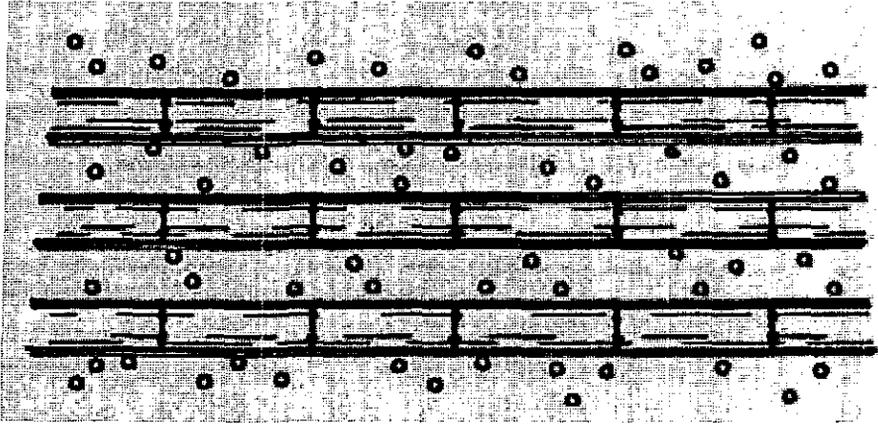


FIGURA 1.5.- Flujo de los gases a través de los tubos rodeados de agua.

En las calderas de tubos de humo, los tubos pueden ser arreglados horizontal o verticalmente encima del horno.

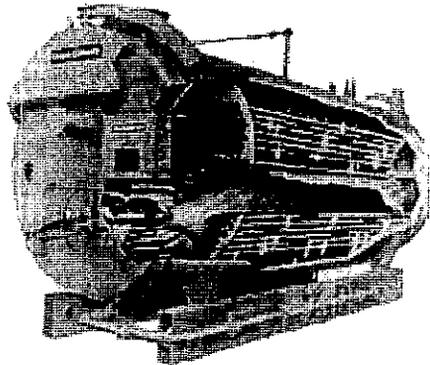


Figura 1.6.- Caldera de tubos de humo de gas natural Cleaver Brooks, Modelo "CB" de 8,000 KW y 250 psig.

En una **caldera de tubos de agua** (acuotubular), como se muestra en el **esquema** de la **figura 1.12**, los gases de combustión se dirigen por la **parte externa** de los tubos en los cuales circula el agua de **caldera**. Algunas veces son insertados deflectores o mamparas en los tubos para controlar la velocidad del gas y proveer una mayor **turbulencia** generando una mejor transferencia de calor.

Independientemente de las clasificaciones, todos los sistemas de vapor incluyen:

- Fuente de vapor.
- Sistema de distribución.
- Equipo terminal (Usuario).

Las fuentes de **energía** de un sistema de vapor pueden ser:

- Aceites, gas, carbón, madera (Combustión).
- Energía nuclear.
- Electricidad.

La **fente** de energía será de acuerdo a las necesidades que tenga el sistema que necesite el servicio. Las calderas eléctricas son de tamaño **pequeño** y de corta capacidad como la que se muestra en la **figura 1.7**, que tan solo tiene una capacidad de 9 KW (35 lb./hr) a 132 psig (9.3 Kg./cm²) de presión.

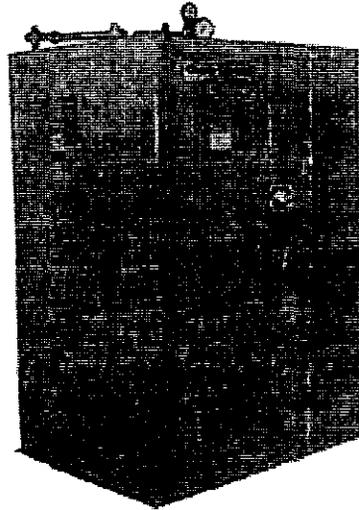


Fig. 1.7.- Caldera eléctrica Cleaver Brooks, de 9 KW y 132 psig.

1.8.1. CALDERAS DE TUBOS DE HUMO.

Las calderas de tubos de humo son usadas en aplicaciones que requieren baja presión y una carga moderada. Las calderas de tubos de humo generalmente tienen tubos de 2" de diámetro o mayores. Son generalmente rectos y relativamente cortos así que los gases calientes de combustión experimentan una caída de presión baja mientras pasan a través de ellos, esto se puede ver con facilidad en la figura 1.8., en donde se muestra a una caldera Kewanee de tubos de humo de fogón corto, con piernas de agua, capacidad de 10,500 lb./hr a 150 psig (10.5 Kg./cm²).

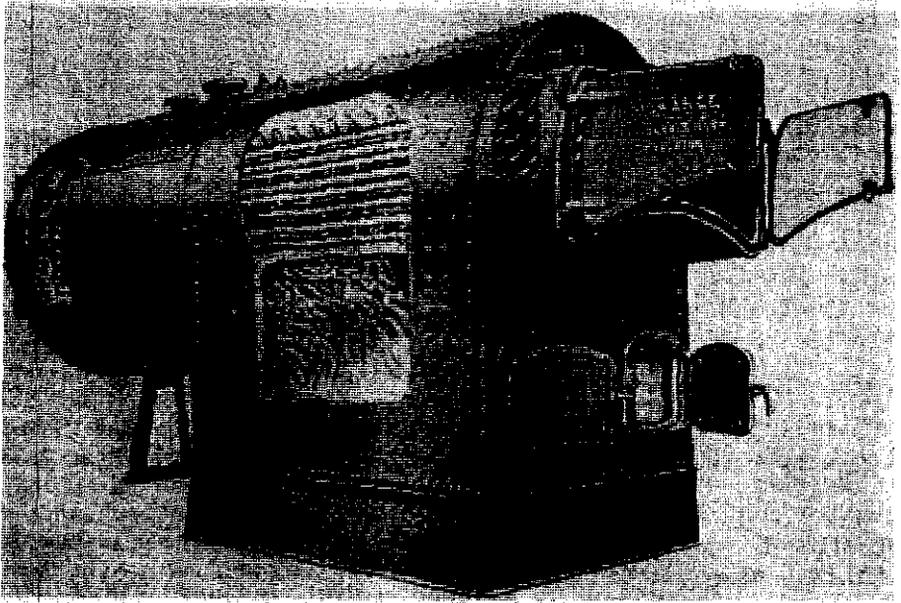


Fig. 1.8.- Caldera de tubos de humo Kewanee Equipment de capacidad de 3000 KW a 150 psig.

Las calderas de tubos de humo son generalmente construidas de forma similar a un intercambiador de calor de tubos y coraza, la caldera de la figura 1.6. ejemplifica esta característica, aunque en la figura 1.9 se presenta otra caldera de tubos de humo en donde dicha característica se puede apreciar con mayor precisión. El espacio de agua que rodea los tubos está usualmente contenida por un recipiente cilíndrico grande. Por esta razón, las calderas de tubos de humo rara vez se diseñan para más de 300 psi de presión.

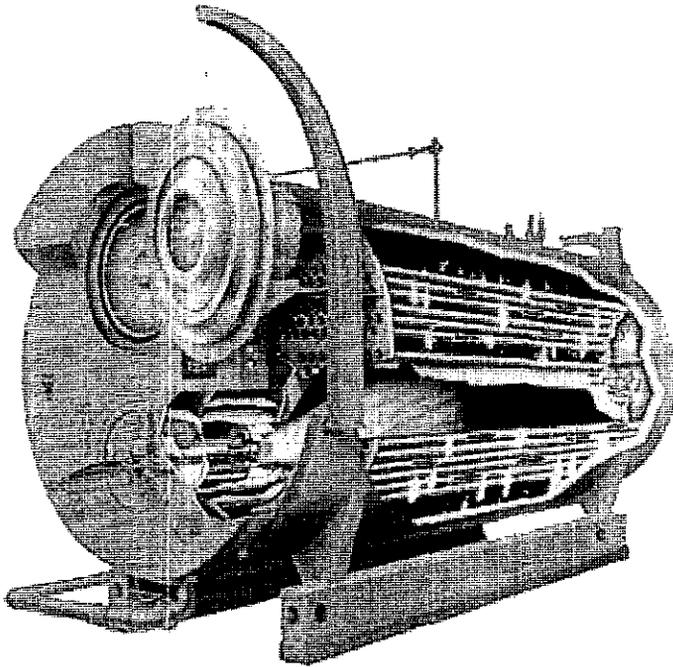


Figura 1.9.- Caldera de tubos de humo Cleaver Brooks,
Modelo CB-LE de 7500 KW y 300 psig.

Las calderas de tubos de humo tienen una cantidad bastante grande de agua contenida por lo que permite una mayor flexibilidad en cuanto a la carga. Además permite un mejor control de las cargas cuando se requieren grandes cantidades de vapor en un periodo de tiempo relativamente corto, como frecuentemente sucede en aplicaciones de procesos industriales.

Las calderas de tubos de humo tienen un tiempo de vida de 25 años o más.

Una clasificación de Calderas de Tubos de Humo es la siguiente:

- Prefabricada.
- De Hierro fundido.
- De Tubos Verticales.

CALDERAS DE TUBOS DE HUMO PREFABRICADAS.

Las calderas prefabricadas son simplemente la caldera y el quemador completamente empacados con todos los componentes ajustados que hace que esté listo para enviarse de la fabrica e instalarse en campo, como una unidad completa, tal como se indica en la figura 1.10.

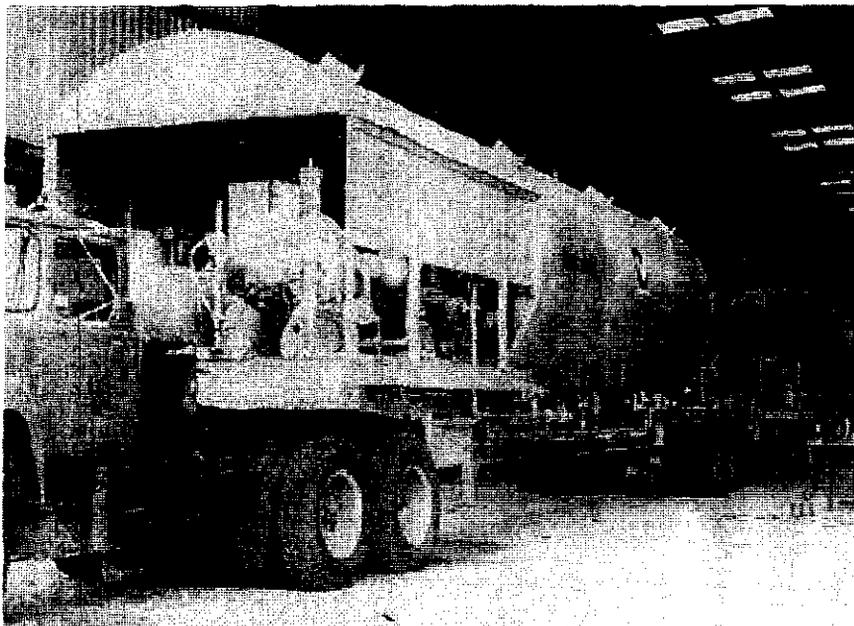


Figura 1.10.- Caldera de tubos de humo prefabricada, de 1500 KW y 100 psig. lista para instalarse.

Las calderas prefabricadas son unidades contenidas en sí mismas que ahorran a sus dueños en costo de instalación y tiempo de entrega.

CALDERAS DE TUBOS DE HUMO HIERRO FUNDIDO.

Las calderas de hierro fundido son un tipo de caldera de tubos de humo de poca capacidad y de baja presión debido a la poca resistencia del material.

CALDERAS DE TUBOS DE HUMO VERTICALES.

Se usan para producir vapor en aplicaciones industriales o comerciales tales como.

- Limpieza seca
- Laminación
- Esterilización
- Lavado de botellas

Las calderas de tubos de humo verticales son abastecidas por gas o aceite. Son una solución barata para pequeñas necesidades de procesos de vapor industriales o comerciales.

1.8.2. CALDERAS DE TUBOS DE AGUA.

En el diseño de calderas de tubos de agua, el agua circula a través de los tubos los cuales están rodeados de gases de combustión (de manera inversa a como se muestra en la figura 1.5.). Las calderas de tubos de agua son identificadas por sus respectivos rangos de caballos de potencia como:

Calderas de Servicios – 1,000 BH¹ y mayores

Calderas Industriales – 300 a 1,000 BH

Calderas Comerciales – hasta 300 BH.

¹ 1 Boiler Horsepower = 1 BH = 34.5 lb. de vapor/hr = 9.803 KW

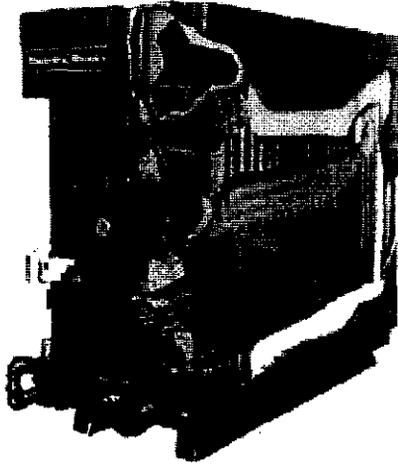


Figura 1.11.- Caldera de tubos de agua Cleaver Brooks
Modelo CB4, 100 KW, 700 psi.

Las calderas de tubos de agua se caracterizan por tener tubos de diámetro pequeño (comparadas con las calderas de tubos de humo) los cuales son más largos, en configuraciones inclinadas, curvos o rectos; muchas de éstas calderas tienen serpentines o tubos configurados en espiral. En la figura 1.11 se puede apreciar una caldera de tubos de agua de 100 KW a 700 psi en la cual los tubos curvos de la caldera se encuentran cubriendo las paredes de la cavidad del horno teniendo así mayor área de transferencia de calor. Por esta razón, la velocidad de absorción de calor por unidad de volumen del horno es relativamente alta comparada con la de las calderas de tubos de humo, estas características también se pueden apreciar en la figura 1.12.

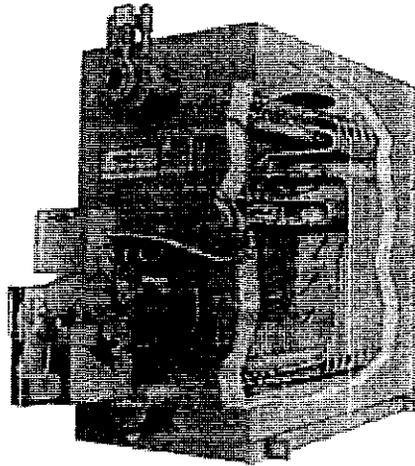


Figura 1.12.- Caldera de tubos de agua Cleaver Brooks modelo FLX, de 200 KW y 500 psig.

Todas las calderas de alta presión arriba de los 300 # son del tipo de tubos de agua debido al hecho de que los tubos de un diámetro y espesor de pared dado pueden resistir una presión interna mucho más alta que la presión externa. En el caso de las calderas de tubos de humo, la coraza tiene que resistir la presión del agua del lado externo de los tubos y está así limitada en su capacidad para funcionar en situaciones de alta presión.

Como la mayor parte de las calderas de tubos de agua tienen grandes áreas de evaporación y alto contenido de agua, son poco sensibles a los cambios en la demanda y el nivel del agua.

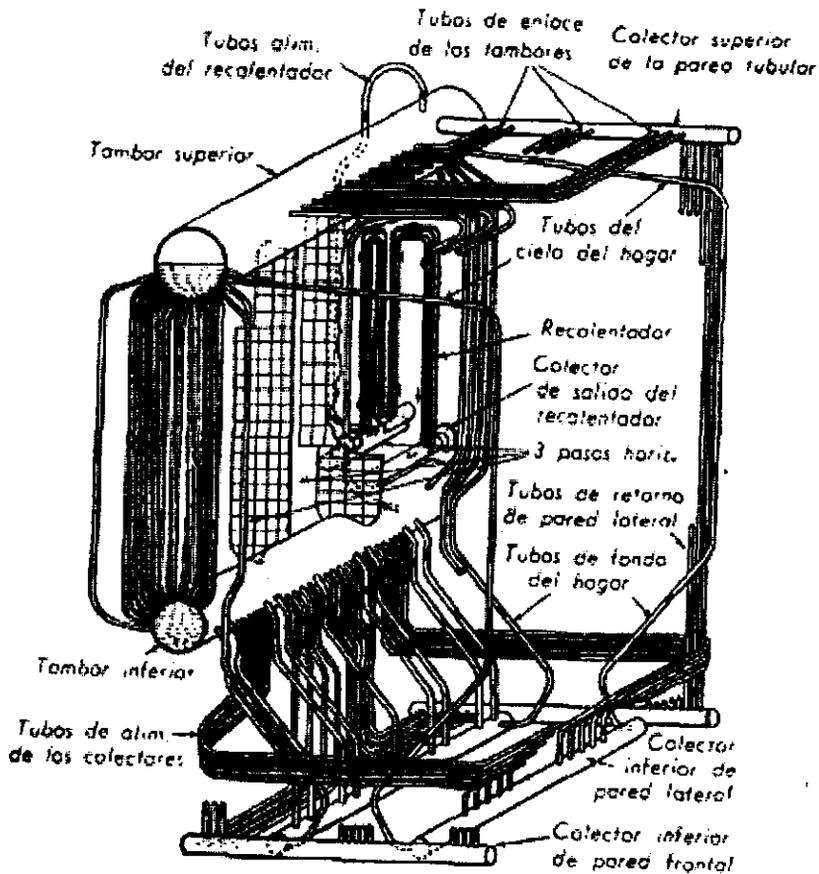


Figura 1.13.- Esquema de la circulación en un hogar de polvo de carbón, tipo F, de la Babcock and Wilcox.

Las calderas requieren de una cuidadosa atención, sistemas de control más sofisticados, un mantenimiento consistente y tratamiento del agua de alimentación. En la figura 1.13 se observa el esquema de una caldera de tubos de agua, en donde se puede notar la complejidad del sistema de transferencia de calor, la cantidad de tubos curvos y la distribución de los mismos.

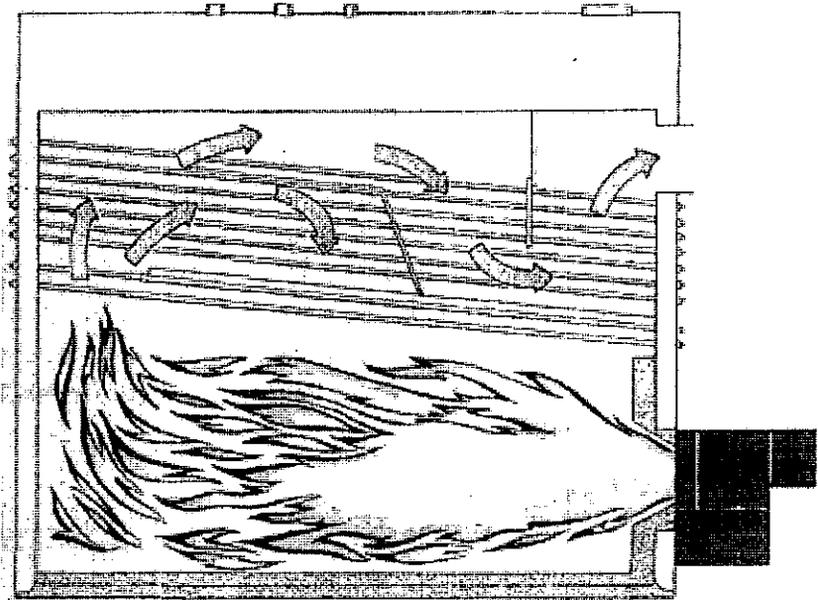


Figura 1.14.- Esquema de una caldera acuotubular de tubos rectos inclinados de tambor longitudinal, nótese que la caldera es de tres pasos.

Existen tres tipos de calderas acuotubulares los cuales son:

- **Calderas acuotubulares de tubos rectos inclinados.**- Este tipo de calderas poseen un haz de tubos inclinados que está conectado a dos cabezales, uno que distribuye agua y otro que recolecta vapor, y estos a su vez están conectados al domo superior (Ver figura 1.14.), este tipo de calderas no poseer domo de lodos como tal, sino que de la parte más baja del cabezal de suministro de agua se extrae la purga. Existen dos tipos de calderas de tubos rectos inclinados.
 - a) De tambor longitudinal.- En este tipo de calderas el domo de vapor se encuentra orientado de forma paralela al haz de tubos, en la figura 1.14 se ejemplifica esta característica, en donde se muestra al domo de vapor a todo lo largo de la caldera.
 - b) De tambor transversal.- En este tipo de calderas el domo de vapor se encuentra orientado de forma perpendicular al haz de tubos.

- **Calderas verticales de tubos rectos.**- En este tipo de calderas el haz de tubos se encuentra montado sobre el domo de lodos de forma vertical y conectado de manera directa a los dos domos como se muestra en la figura de 1.15. hay que señalar que este tipo de calderas permiten el ahorro de espacio, cuando éste es una de las limitantes del diseño.

- **Calderas acuotubulares de tubos curvos.**- Este tipo de calderas se diseñan de tal manera que se aproveche la mayor cantidad de calor que se genera en el horno de la caldera, esto se logra con la distribución de los tubos curvos en la pared del horno. En las figuras 1.12. y 1.13. se muestran calderas de tubos curvos que ejemplifican tales características.

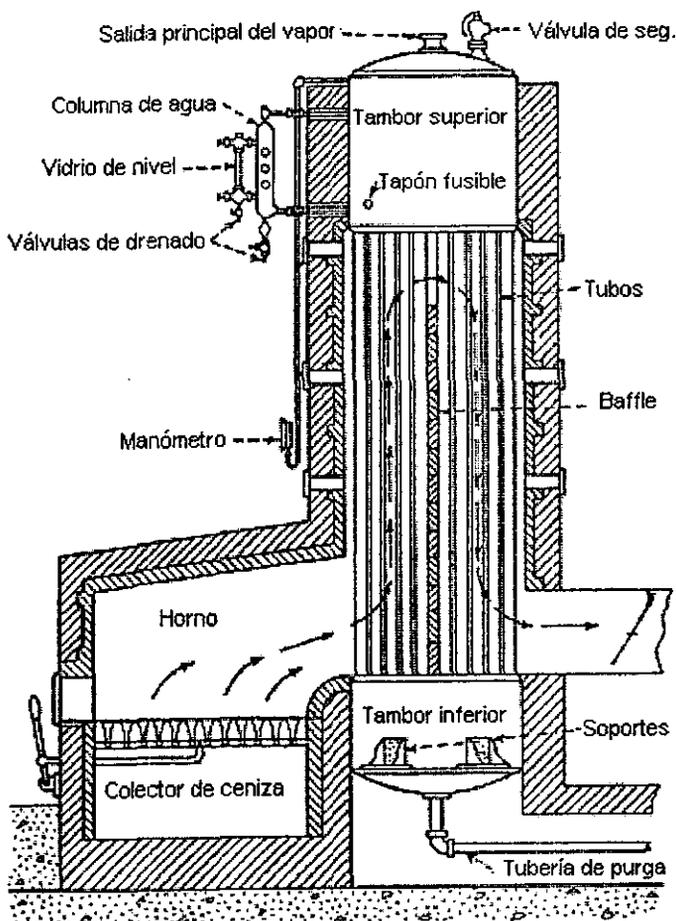


Figura 1.15.- Esquema de una caldera acuotubular vertical de tubos rectos, note que la caldera es de dos pasos.

1.9. CLASIFICACION EN FUNCION DE LA PRESION DE OPERACION.

Debido a que varios códigos y normas definen el diseño y operación de calderas y recipientes a presión, los sistemas de producción de vapor se clasifican, de acuerdo a la presión de operación, en baja y alta presión.

Sistemas de baja presión.- este equipo se construye de acuerdo con el código ASME y tiene una presión de operación menor a 15 Psi.

Sistemas de alta presión.- Este equipo también se diseña de acuerdo con el código ASME y tiene presiones de operación iguales o mayores a 15 Psi.

1.10. - ARREGLOS EN LOS SISTEMAS DE VAPOR.

Las calderas son llamadas “de dos pasos”, “de tres pasos” y “de cuatro pasos”, de acuerdo al número de veces que los gases liberados en la combustión se conducen a través de la caldera antes de que salgan por la chimenea, esto se ejemplifica en la figura 1.16 en donde se muestran cada uno de los tipos de arreglos para calderas, de donde podemos observar que cuando los gases de combustión pasan por el haz de tubos una vez más se les llaman calderas de dos pasos, y cuando pasan dos veces más se les llama calderas de tres pasos, y así sucesivamente.

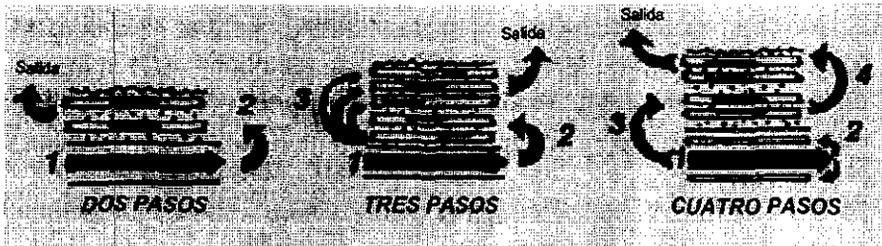


Figura 1.16.- El número de veces que los gases atraviesan el haz de tubos determina el número de pasos.

En la figura 1.8.- se muestra una caldera de fogón corto, con piernas de agua, en donde los gases de combustión se generan en el horno para atravesar la primera parte del haz de tubos que consta de una sección de tubos cortos, para después pasar nuevamente por el haz de tubos pero esta vez por la sección superior, que consta de

tubos más largos que los de la primera sección, para posteriormente ser expulsados a la atmósfera. Por lo cual, la caldera ejemplificada en la figura 1.8 es de dos pasos.

1.11. - CARGA DE LOS SISTEMAS DE VAPOR.

Cuando se requiere vapor para servicio de calentamiento por lo general se utiliza vapor a baja presión. En procesos industriales el tipo de vapor utilizado por lo general es de alta presión en donde el calor del vapor se usa en el proceso mismo.

La carga de un sistema de producción de vapor se mide en libras de vapor por hora (a una presión y temperatura especificada). Para determinar la carga del sistema, se necesita conocer la siguiente información:

- Tipo de vapor.
 1. Vapor saturado.
 2. Vapor sobrecalentado.
- Tipo de Carga.
 1. Continua.
 2. Batch.

La carga de una caldera debe incluir amplias variaciones temporales pero no grandes cambios instantáneos de demanda, además nos puede dar una idea de las dimensiones aproximadas del equipo.

La carga continua esta definida como una carga que es justamente constante, sin grandes variaciones. La carga batch se caracteriza por demandas de vapor en tiempos cortos.

Debido al hecho de que una demanda instantánea muy grande puede ser, algunas veces, mayor que la capacidad de la caldera, se realizará una selección muy cuidadosa de la caldera en tales situaciones.

Las calderas deben ser capaces de manejar la mínima y la máxima carga sin ningún problema.

La importancia de estudios fundamentales del agua a nivel laboratorio y planta piloto simulando las condiciones de las calderas de campo ha tenido gran énfasis debido a las tendencias actuales de diseño y operación de las calderas. El deseo de obtener máxima descarga de vapor por capital invertido y operar bajo carga continua ha traído nuevos problemas de operación de las mismas.

A fin de obtener datos básicos e información práctica en el laboratorio y que sean reproducibles, se han empleado diferentes tipos de calderas. Las dos más comúnmente usadas son las de multitubo y las calentadas con gas, además de las calderas miniatura empleadas para estudios de espumantes y estudios de pureza del vapor, y las calderas de un solo brazo lateral diseñadas para el estudio de depósitos y deterioro de metales. Estos diseños carecen de intercambiabilidad y son eficientes solo si se emplean para el diseño propuesto.

Desde el punto de vista de interés en aquellos factores químicos concernientes al fenómeno del lado agua, la posibilidad de controlar estrechamente la operación de la caldera, la alimentación de la caldera, concentraciones y consumo de energía en una pequeña unidad a escala, es sumamente deseable. También es deseable poder reproducir las condiciones de operación de las calderas industriales y realizar corridas en planta piloto en un periodo razonable, sobre cantidades prácticas de agua de alimentación.

Revisando trabajos previos con calderas experimentales, se observó que prácticamente todas las unidades existentes estuvieron sujetas a dificultades en cuanto a duplicar los resultados sobre corridas sucesivas, esto se refiere a que la no se lograba una *reproducibilidad entre una corrida y otra*, por lo que no se obtenían datos confiable en las investigaciones realizadas. Asimismo ninguno tuvo cuidado de examinar réplicas de especímenes producidos en una misma prueba mientras se estudiaron los problemas de formación de depósitos, fallas del metal y corrosión. Es deseable lograr la reproducibilidad de los datos entre corridas durante alguna investigación y que la precisión de los datos aumente en proporción al número de replicas evaluadas.

2.1. - CARACTERÍSTICAS DESEABLES DE LA CALDERA EXPERIMENTAL

El objetivo principal del diseño de la caldera experimental es obtener un sistema práctico a nivel planta piloto en el cual se puedan dar resultados en una sola corrida y que sean reproducibles a condiciones de operación iguales a las de campo.

Este sistema debe de contar con las tres zonas necesarias (ver fig. 2.1) con las que consta un sistema de generación de vapor industrial:

- Caldera (generación de vapor).
- Precaldera (Precalentamiento y deaereación).
- Retorno de Condensado.

De las cuales se hablará con detalle mas adelante, haciendo una analogía entre el sistema piloto y los sistemas industriales.

SISTEMA PILOTO DE GENERACION DE VAPOR

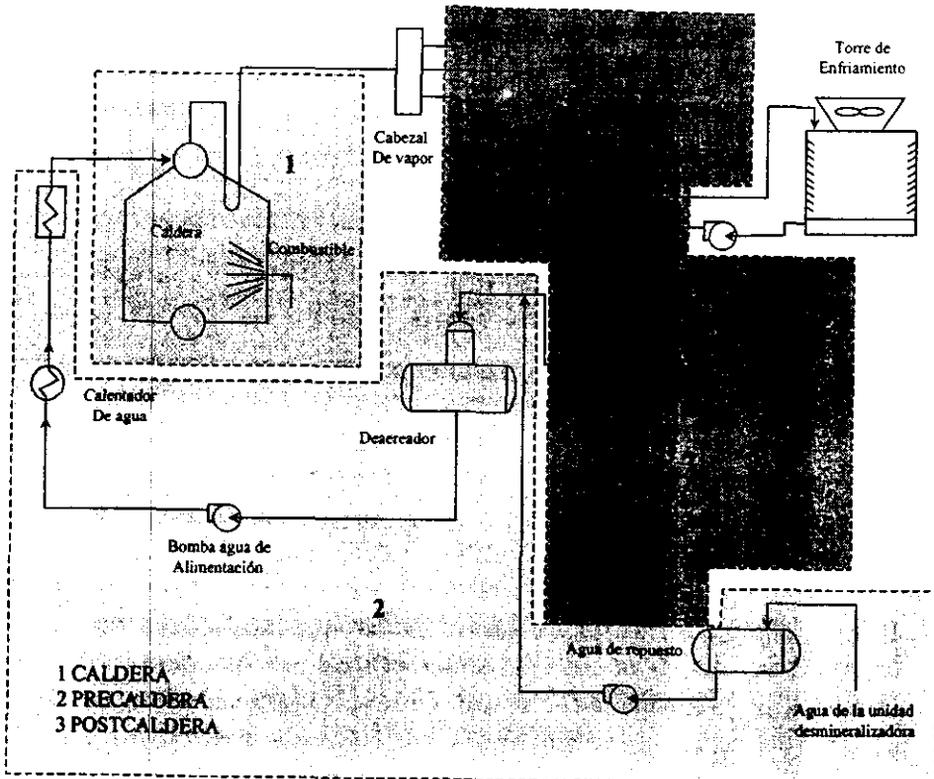


Figura 2.1. Diagrama de flujo de un sistema industrial de generación de vapor

Uno de los aspectos importantes a considerarse en el diseño de la caldera es el de poder obtener resultados de evaluación los cuales puedan reproducirse, por lo que la caldera deberá de contar con los siguientes aspectos.

1. - Capacidad para operar a las condiciones de temperatura y presión de los equipos industriales.
2. - Un diseño que facilite la evaluación de la magnitud y características de los depósitos de incrustación y el ensuciamiento de la caldera bajo varias condiciones de operación.
3. - Disposición para el estudio del espumado y arrastres al mismo tiempo en el que el estudio del depósito y ensuciamiento se están realizando.
4. - Rápida velocidad de vaporización para realizar una corrida de prueba en un periodo de tiempo razonable.
5. - Incorporar en su construcción partes intercambiables, las cuales permitan realizar estudios sobre fallas del metal, incrustación o corrosión sin tener que construir otra unidad básica.

Existen algunas dificultades para duplicar las condiciones de las calderas de campo en una pequeña caldera de laboratorio. Sin embargo, se puede aprender mucho de una caldera experimental la cual debe operar bajo condiciones estrictamente controladas y la cual proveerá una serie de datos reales que puedan correlacionarse con resultados de campo.

Después de una investigación considerable se decidió estudiar trabajos previos de algunos tipos de unidades que se hayan usado para pruebas de laboratorio y unificarlos para la realización de una caldera estándar de un solo tubo, eléctricamente calentada e incorporando un tubo de transferencia de calor removible.

Se eligió una caldera de un solo tubo, de recirculación natural, con generación de calor por fuente eléctrica, instalada en una probeta removible y en la que se pueda observar la eficiencia de inhibición

a la incrustación, corrosión, etc. En la figura 2.2 se muestra un sistema reportado en la literatura, en el cual se basó para el diseño del sistema de generación de vapor de la caldera experimental.

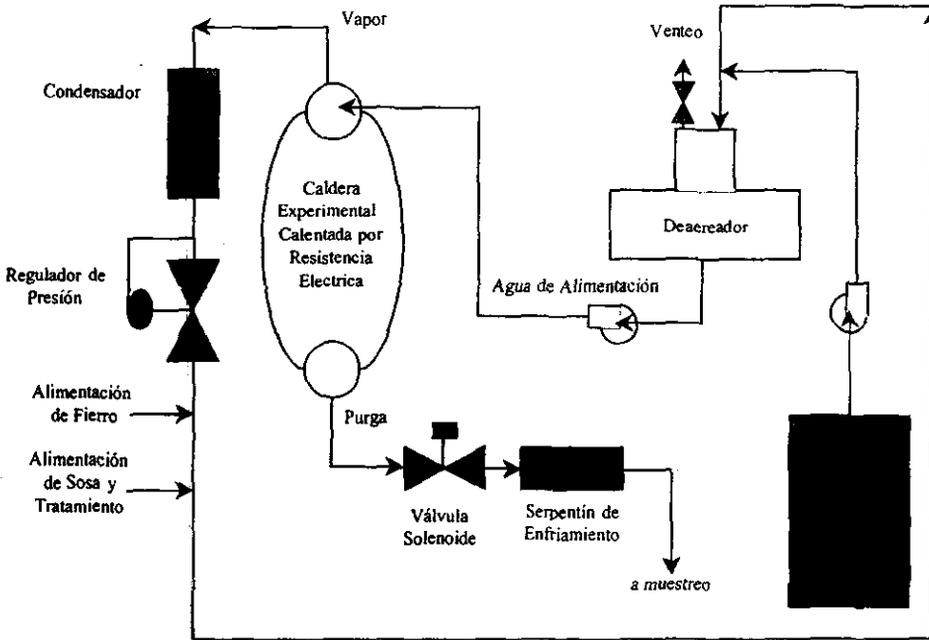


Figura 2.2 Diagrama Esquemático de una Caldera para Investigación en Laboratorio

2.2. - CALDERA (GENERACIÓN DE CALOR)

La caldera es la parte principal de un sistema generador de vapor, la cual tiene algunas características necesarias con las que debe de contar cualquier equipo ya sea industrial o piloto.

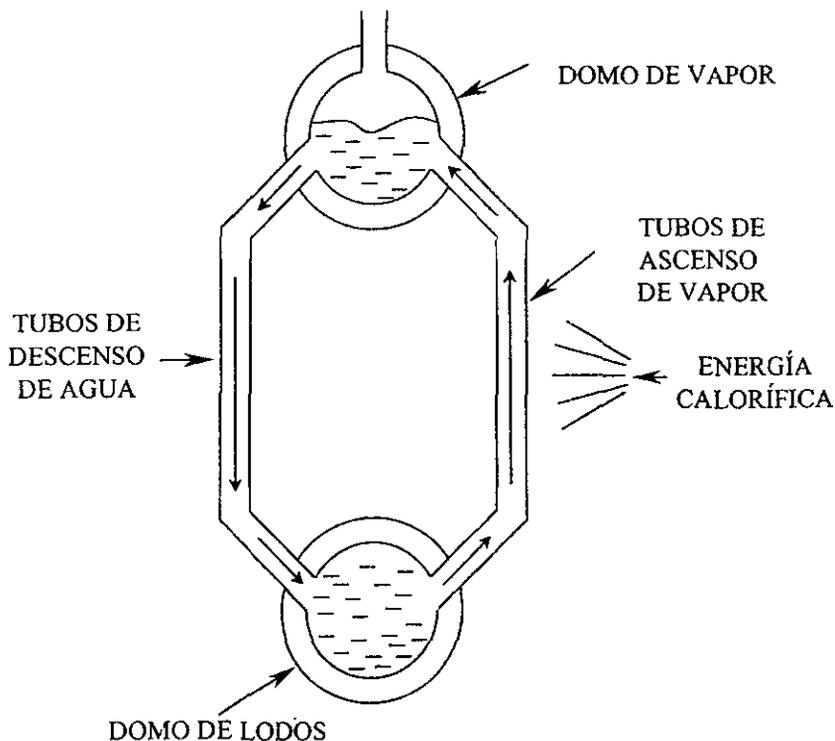


Figura 2.3. - Zonas características de una caldera industrial

En la fig. 2.3 se muestra un esquema general de una caldera industrial en el que se representan las zonas principales.

Hay que resaltar principalmente que el equipo piloto debe de contar con estas características básicas de los equipos industriales.

Las características morfológicas del equipo principalmente se basaron en los fundamentos de diseño del tubo de Thiele en el cual por sus características favorece la recirculación natural del agua, provocado por la diferencia de densidades entre el vapor y el agua existentes en el equipo durante su operación, tomando en cuenta que si se tiene menor diámetro en el tubo conforme se va logrando el cambio de fase de agua a vapor se aumenta la recirculación del

SISTEMA PILOTO DE GENERACION DE VAPOR

vapor logrando que exista un mayor desplazamiento del vapor por el tubo de ascenso para lograr mayor presión.

Haciendo una analogía entre el esquema general de una caldera se puede ver que el equipo propuesto cuenta con todas y cada una de las zonas principales con las que debe contar una caldera

Como se puede observar en la figura 2.4, se representan las zonas principales de un equipo industrial, dentro del equipo piloto propuesto.

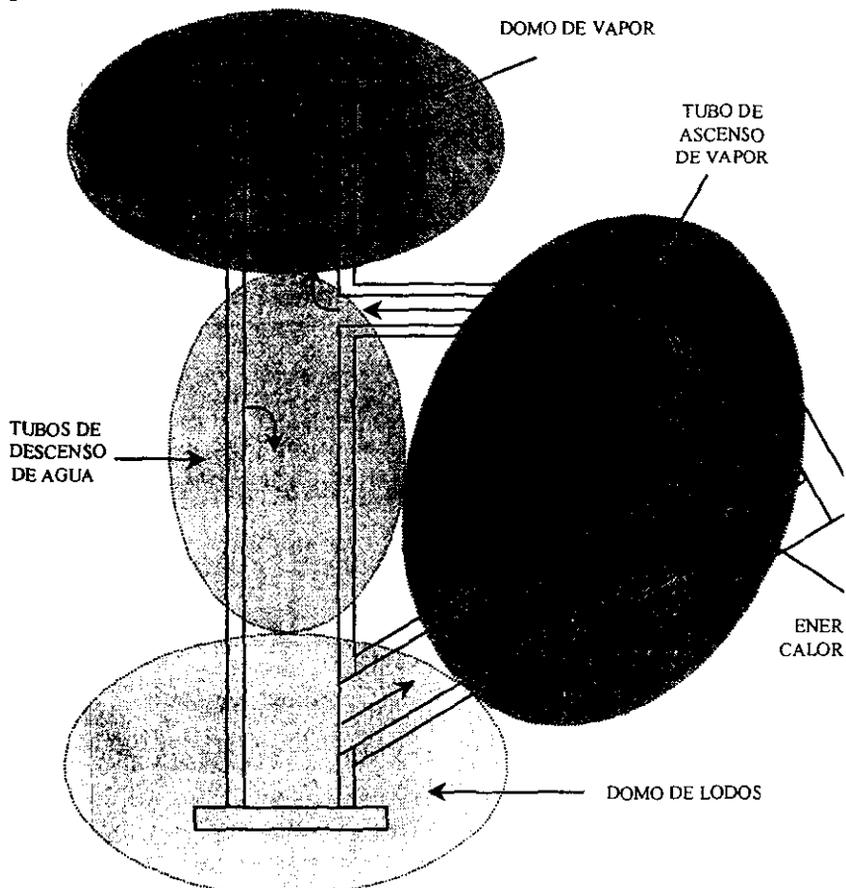


Figura 2.4 Similitud de las zonas principales de una caldera industrial en el equipo piloto.

2.3. - PRECALDERA (PRECALENTAMIENTO Y DEAEREACIÓN)

Como en todo sistema industrial de generación de vapor, el equipo piloto debe de contar con una zona llamada precaldera, que es donde se da tratamiento al agua de alimentación a la caldera.

2.3.1 TRATAMIENTO DEL AGUA DE ALIMENTACIÓN

El tratamiento del agua de alimentación, en un sistema industrial, se utiliza para remover las sales presentes en el agua, lo cual se logra mediante las unidades desmineralizadoras.

También se debe “deaerear” el agua para eliminar el oxígeno presente en el agua y así evitar la corrosión en la caldera.

En la figura 2.1 se presentó un diagrama de flujo de un sistema industrial de generación de vapor, donde se representan las tres zonas generales, ya mencionadas

La zona de precaldera en el sistema propuesto se representa en la figura 2.5, donde se muestra la configuración del sistema deaereador.

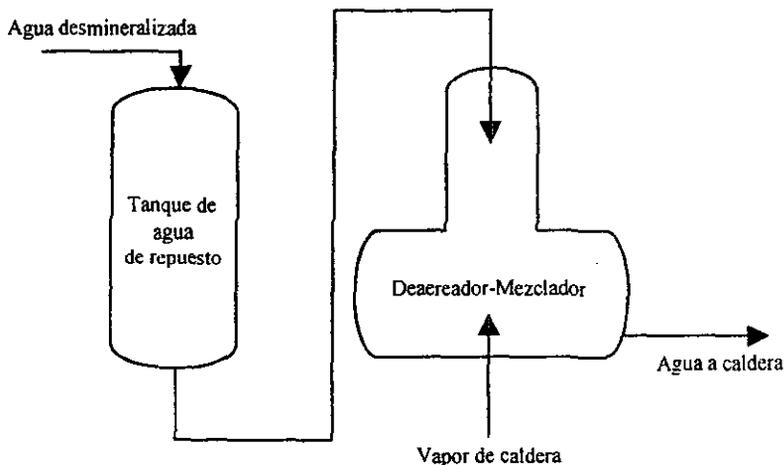


Figura 2.5 Esquema de la zona de precaldera del sistema piloto.

Como se menciona el sistema piloto debe de contar con las características principales de un sistema industrial, por lo que se describirá brevemente cada una de estas:

2.3.2. UNIDADES DESMINERALIZADORAS.

Para sustituir la necesidad de una unidad desmineralizadora, la caldera experimental piloto debe de trabajar, todas y cada una de sus corridas de prueba con agua desmineralizada proveniente de las UDAS (Unidades Desmineralizadoras).

2.3.3. LA ZONA DE PRECALENTAMIENTO Y DEAEREACIÓN.

Estas se integran en el tanque deaerador - mezclador, en el cual se aprovechara el vapor generado por la caldera para la deaereación del agua de repuesto y a su vez precalentarla. La deaereación se logrará al contactar a contracorriente el flujo de vapor con el flujo de agua para favorecer o promover la eliminación del oxígeno disuelto, el cual saldrá del tanque deaerador por arrastre con el vapor por medio de una válvula de desfogue.

2.4. - POSTCALDERA (RETORNO DE CONDENSADOS)

El vapor generado en la caldera, en sistemas industriales, es utilizado por diversos usuarios, una de las principales aplicaciones es en la generación de energía eléctrica mediante turbinas de vapor, en las plantas de proceso es uno de los principales servicios auxiliares, ya sea para calentamiento de fluidos de proceso u otras aplicaciones.

Como se puede ver en la figura 2.1 esta zona corresponde a la aplicación del vapor para calentamiento, generación de energía eléctrica, para generar vacío, etc.

CAPITULO II

Dentro del sistema de generación de vapor piloto se sustituyen estos usuarios por el tanque deaerador - mezclador, el cual utiliza el vapor generado por la caldera, como ya se dijo antes, para precalentar el agua de alimentación a caldera, deaerarla y donde se mezcle el condensado con el agua de repuesto. Esto se puede observar en la figura 2.6.

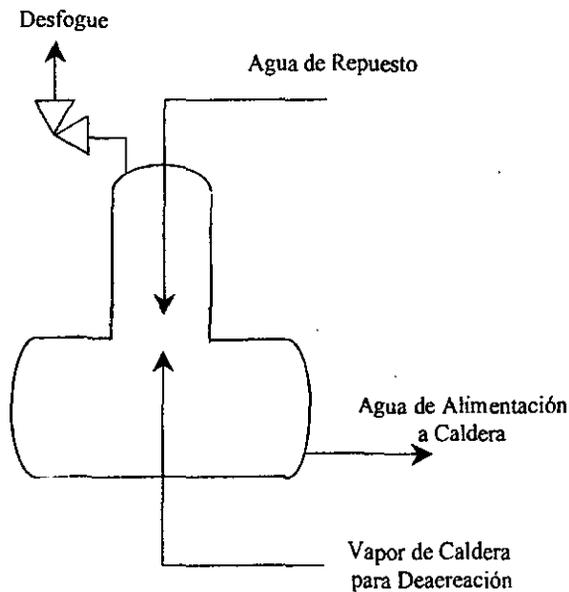


Figura 2.6 Postcaldera (Zona de deaeración y precalentamiento).

Hay que resaltar que este tanque tiene dos funciones principales:

- 1) Funciona como parte de la zona de precaldera, ya que en este punto al agua de repuesto se le elimina oxígeno disuelto para tener agua de alimentación a caldera con las características deseadas.

SISTEMA PILOTO DE GENERACION DE VAPOR

- 2) Por otro lado es el único usuario del vapor generado en la caldera, con el que cumple su función de deaerear y precalentar el agua de alimentación, esta es una característica única del sistema de generación de vapor propuesto.

2.5. - SISTEMA PILOTO DE GENERACIÓN DE VAPOR.

La función principal del sistema de generación de vapor propuesto es, como se había mencionado anteriormente, la reproducción de las condiciones de operación de calderas industriales para evaluar la eficiencia de los aditivos comerciales en cuanto a inhibición a la incrustación y corrosión, y además para seleccionar un tratamiento adecuado y acorde a las características físico-químicas del agua con que se esté realizando la evaluación.

Este sistema también debe de simular condiciones de temperatura y presión de sistemas industriales.

En la figura 2.7 se puede observar el diagrama del sistema ya integrado con el equipo principal de proceso.

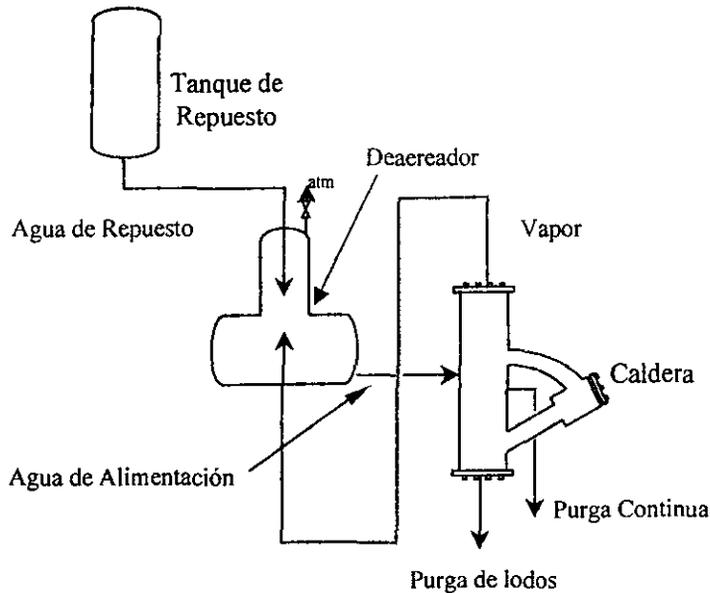
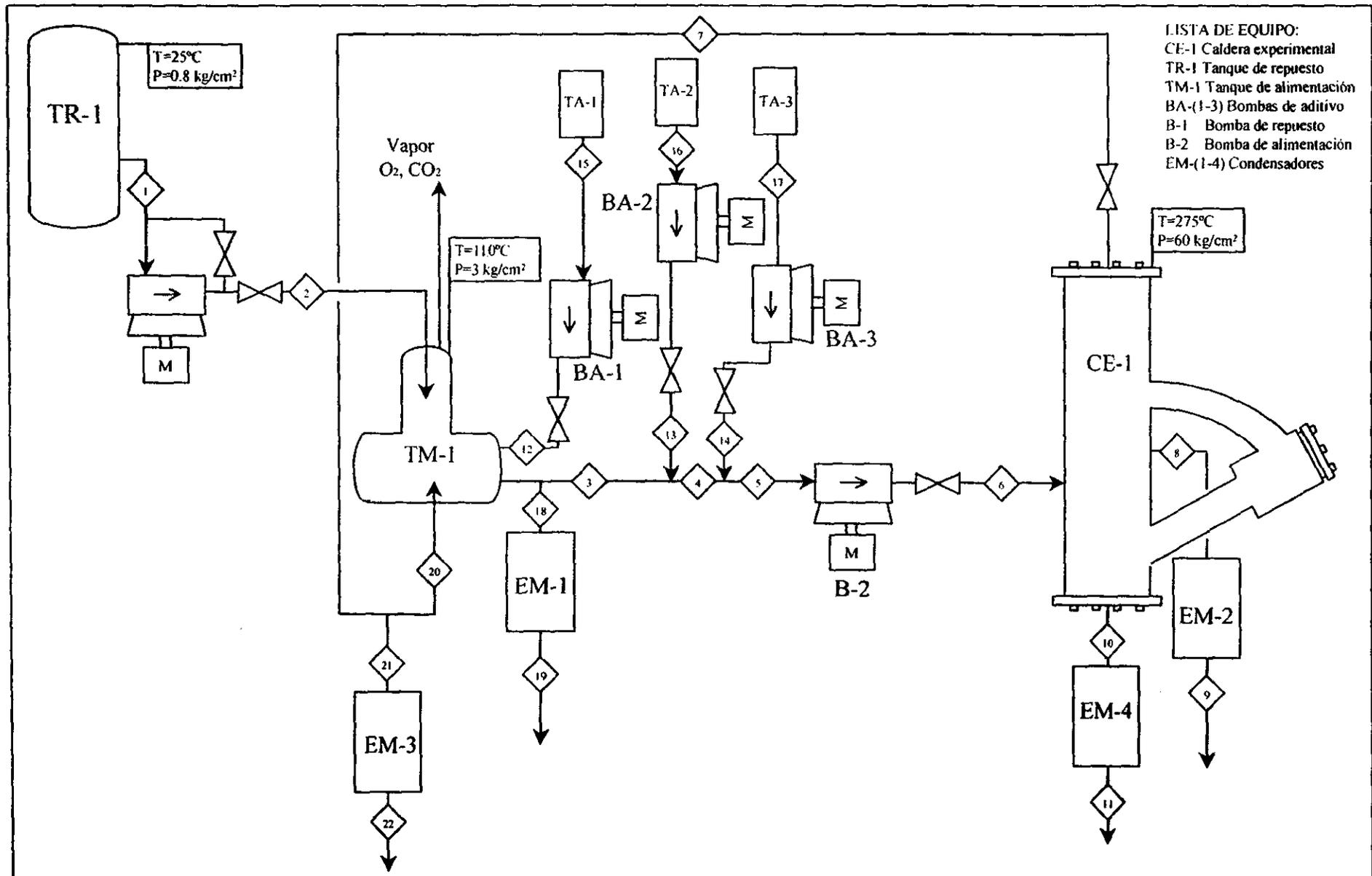


Figura 2.7. - Integración del Sistema Piloto de Generación de Vapor

2.6. - DESCRIPCIÓN DEL PROCESO.

Después de haber presentado los aspectos generales de como debe estar constituido el sistema de generación de vapor propuesto, se dará una breve descripción del proceso, esquematizándose en el diagrama de flujo de la figura 2.8.

Al tener agua desmineralizada en el tanque de repuesto, esta se bombea para el tanque deaerador donde el agua será calentada hasta $110\text{ }^{\circ}\text{C}$, con el objeto de garantizar la salida del vapor se estableció como presión de operación para este equipo 3 Kg/cm^2 , en este recipiente, el agua se pone en contacto a contraflujo con vapor proveniente de la caldera, para disminuir la concentración de oxígeno disuelto, el oxígeno remanente se inhibe con un secuestrante de oxígeno que se adiciona en el mismo equipo, posteriormente el agua deaerada se introduce a la caldera a una presión de descarga de 60 Kg/cm^2 , dentro de la caldera el agua se



- LISTA DE EQUIPO:
 CE-1 Caldera experimental
 TR-1 Tanque de repuesto
 TM-1 Tanque de alimentación
 BA-(1-3) Bombas de aditivo
 B-1 Bomba de repuesto
 B-2 Bomba de alimentación
 EM-(1-4) Condensadores

DISEÑO: HARRISON BERISTAIN CARLOS MANCERA CORTÉS MARIO	REVISÓ: JESUS MARIN C.		FIGURA 2.8. DIAGRAMA DE FLUJO DE PROCESO CALDERA EXPERIMENTAL
	APROBÓ: JESUS MARIN C.		
	CLIENTE: IMP		
	FECHA: 11/Ene/99		

calienta hasta alcanzar la temperatura de 275 °C (temperatura de ebullición del agua a 60 Kg/cm²) y se evapora, el vapor producido se envía al deaerador y posteriormente se desecha.

Para llevar a cabo el control de los ciclos de concentración[†], dentro de la caldera, se purga agua del seno de la misma, además se establecen puntos de muestreo estratégicos para el monitoreo constante (ver figura 2.8).

2.7. - BASES DE DISEÑO.

1. Antecedentes.

La caldera experimental a nivel planta piloto fue diseñada para producir 60 g/min. de vapor de agua, lo que permitirá llevar a cabo la evaluación comparativa de aditivos para el tratamiento interno de calderas.

De acuerdo a las necesidades de desarrollo y modernización de PEMEX – REFINACION, esta dependencia solicitó al IMP el diseño de una pequeña caldera que fuera capaz de reproducir las condiciones de operación de los equipos industriales que posee PEMEX, cabe señalar que el equipo de tratamiento del agua de alimentación a caldera no se incluye debido a que solo se pretende reproducir las condiciones de operación dentro de las calderas y no en el equipo de tratamiento del agua y por lo tanto esta caldera trabajará con agua previamente tratada.

2. Generalidades.

2.1. Función de la caldera piloto.

La función de la caldera a nivel planta piloto es llevar a cabo la evaluación comparativa de aditivos para el tratamiento interno de calderas, que incluyen:

- Inhibidores de corrosión.
- Dispersantes.
- Neutralizantes.

[†] Para el cálculo de los ciclos de concentración ver la sección 2.15 del manual de operación del Anexo A.

2.2. Tipo de caldera.

La caldera piloto consiste básicamente en la desaereación de agua para calderas previamente tratada, obtenida directamente de refinería. Para la posterior generación de vapor por medio de una caldera eléctrica asistida por una resistencia eléctrica de 3000 W, el vapor generado será reutilizado para deaerear el agua de alimentación.

3. Capacidad, rendimiento y flexibilidad.

3.1 Factor de servicio.

La caldera piloto operará en 5 días a la semana teniendo un factor de servicio 0.71.

3.2 Capacidad y rendimiento.

La capacidad de diseño máxima será de 60 g/min. de vapor saturado.

La capacidad normal será igual a la de diseño.

La capacidad mínima de la planta será de 30 g/min. (50% de la capacidad de diseño).

3.3. Flexibilidad de operación en condiciones anormales.

La planta no operará a la falla de alguno de los servicios siguientes:

- Electricidad.
- Agua de enfriamiento.
- Drenaje para el agua.

Para cualquier caso en que la planta no opere se efectuará un paro ordenado de la misma según el manual de procedimientos.

3.4. Previsión para ampliaciones futuras.

No se contemplan previsiones para ampliaciones futuras, por arriba de la capacidad de diseño.

4. Especificación de la alimentación.

Para efectos de balance de materia y energía se considera que la alimentación normal a la caldera piloto es:

SISTEMA PILOTO DE GENERACION DE VAPOR

Agua de alimentación.	ppm máx.
CaCO ₃	< 5.0
Fe	< 5.0
O ₂	< 7.0
CO	< 7.0
SiO ₂	< 1.0

4.1. Condiciones de alimentación en límites de baterías.

Carga	Estado físico	Presión	Temperatura	Forma en que se recibe.
Agua de alimentación	Líquido	Atm.	Ambiente	Tambores de 200 L de polietileno.
Aditivos	Solución acuosa.	Atm.	Ambiente	Garrafrones 20 L polietileno.

5. Especificación de los productos.

Condiciones de los productos en límites de batería.

Producto.	Edo. físico	Presión máxima.	Temperatura máxima.	Forma de entrega.
Agua	Líquido condensado	2 Kg./cm ²	90 ° C	Al drenaje.

6. Eliminación de desechos.

El agua utilizada para la evaluación de un aditivo que sobre en una prueba y las mismas disoluciones de aditivos pueden enviarse directamente al drenaje ya que las concentraciones de aditivos cumplen las especificaciones que la ley general de equilibrio ecológico estipula para tal fin. El agua de enfriamiento se enviará al drenaje también.

CAPITULO II

7. Servicios auxiliares.

El laboratorio en donde se encuentre ubicada la caldera piloto proporcionará todos los servicios auxiliares en límites de batería según se indica a continuación:

7.1. Alimentación de energía eléctrica.

La energía eléctrica necesaria debe tener las siguientes características:

Volts:	Fases:	Frecuencia:
220	3	60

7.2. Agua de enfriamiento.

Las condiciones del agua de enfriamiento en límite de batería serán las siguientes:

Presión en Kg./cm ² máxima.	Temperatura °C
Máx. / Nor. / Mín.	Máx. / Nor. / Mín.
2.0 / 1.8 / 1.5	27/25 /25

8. Sistema de seguridad.

El laboratorio donde se encuentre ubicada la caldera piloto deberá contar con un sistema de seguridad adecuado para equipos a alta presión.

9. Condiciones climatológicas.

9.1 Temperatura.

Máx. extrema.	43 °C
Mín. extrema.	5 °C
Promedio	24 °C

9.2. - Humedad.

Máxima:	100 % a 27°C
Mínima:	7 % a 12 °C

10. Localización de la caldera piloto.

La caldera se localizará en el Instituto Mexicano del Petróleo, en la Ciudad de México, en los laboratorios de plantas piloto.

11. Bases de diseño para tuberías.

Soportes de tubería y trincheras.

SISTEMA PILOTO DE GENERACION DE VAPOR

Todos los soportes se fijarán a la mesa que se diseñó para soportar la caldera, la tubería, las bombas y el deaerador.

12. Bases de diseño para instrumentos.

12.1. Se usarán señal electrónica para procesamiento de datos.

12.2. La calibración de los instrumentos será en las siguientes unidades:

Presión: Kg./cm²

Temperatura : °C

Flujo de líquido: g/min.

Flujo de vapor: cm³/min.

13. Bases para diseño de equipo.

13.1. Bombas.

Tipo de accionamiento: Motor eléctrico (M).

14. Normas, códigos y especificaciones:

Recipientes a presión y caldera	ASME.
Tubería.	ANSI
Electricidad	NEMA, NEC
Cambiadores	ASME, TEMA
Instrumentos	ISA

Con base a las características que se explicaron en el capítulo anterior, en el presente capítulo se estimarán las dimensiones de los equipos del sistema propuesto, existen algunos equipos que no fue necesario realizar cálculos, pues no necesitan un diseño especial y se pueden adquirir prefabricados, tal es el caso de TR-1, que es el recipiente que contendrá el agua de repuesto a presión atmosférica y basta con utilizar un recipiente de polietileno de alta resistencia de 200 litros, para el caso de TA-1, TA-2 y TA-3 que operan también a presión atmosférica se utilizarán buretas graduadas de dos litros, esto con el fin de controlar las dosificaciones que se den al sistema.

3.1. - DISEÑO DE TUBERIA.

Debido a las condiciones que se manejan en el sistema propuesto, la tubería deberá ser manejable, segura ($P = 60 \text{ Kg/cm}^2$), durable y tenaz. Por tal motivo se realiza un diseño que cubra las características antes mencionadas.

3.1.1. - Selección del material de la tubería.

En la tubería de proceso no se llevará a cabo ninguna evaluación y su única función es el transporte de materia, considerando además que los fluidos de proceso son agua y vapor y la durabilidad que se desea para la tubería, se especificó acero inoxidable 316 como el material de la tubería de proceso para todo el sistema.

3.1.2. - Dimensionamiento de la tubería.

Para el dimensionamiento de la tubería del vapor se tienen los siguientes datos:

$$P = 850 \text{ Psi.}$$

$$T = 275 \text{ }^\circ\text{C.}$$

$$Q = 60 \text{ g/min.}$$

$$V_{\text{recomendada}} = 500 \text{ ft/min.} = 15,240 \text{ cm/min.}$$

$$\rho_{\text{vapor } T=275 \text{ }^\circ\text{C, } P=850 \text{ Psi}} = 0.029 \text{ g/cm}^3.$$

Cálculo de diámetro:

$$V = \frac{Q}{\rho A} = \frac{4Q}{\pi \rho D^2}$$

$$D^2 = \frac{4Q}{\pi \rho V}$$

$$D = \sqrt{4Q/(\rho \pi V)} = \sqrt{4 \cdot 60 \text{ g/min} / (0.029 \text{ g/cm}^3 \cdot 3.1416 \cdot 15,240 \text{ cm/min})}$$

$$D = 0.4 \text{ cm} = 0.157 \text{ in.}$$

La tubería con $D_{\text{nominal}} = 1/4''$ cumple con el diámetro interno de 0.157 in

Para la tubería de vapor $D_{\text{int}} = 0.152''$

Para el dimensionamiento de la tubería del agua se tienen los siguientes datos:

$$P = 850 \text{ Psi.}$$

$$T = 275^\circ\text{C.}$$

$$Q = 60 \text{ g/min.}$$

$$V_{\text{recomendada}} = 10 \text{ ft/min.} = 304.8 \text{ cm/min.}$$

$$\rho_{\text{vapor } T=275^\circ\text{C, } P=850 \text{ Psi}} = 1.0 \text{ g/cm}^3.$$

Despreciando las pérdidas por fricción, se tiene:

Cálculo de diámetro:

$$V = \frac{Q}{\rho A} = \frac{4Q}{\pi \rho D^2}$$

$$D^2 = \frac{4Q}{\pi \rho V}$$

$$D = \sqrt{(4Q/(\rho \pi V))} = \sqrt{4 \cdot 60 \text{ g/min.} / (1 \text{ g/cm}^3 \cdot 3.14159 \cdot 304.8 \text{ cm/min.})}$$

$$D = 0.5 \text{ cm} = 0.19 \text{ in.}$$

La tubería con $D_{\text{nominal}} = 1/4''$ cumple con el diámetro interno de 0.19 in aproximadamente, lo que incrementará ligeramente la velocidad, pero sin crear grandes pérdidas de presión.

Para la tubería de agua $D_{\text{int}} = 0.152''$

Por lo que se puede ver, se utilizó el mismo diámetro tanto para vapor como para agua. Esto hace práctico el cambio e instalación de tubería que pudiera dañarse.

3.1.3. – Cálculo de espesor de la tubería.

El cálculo del espesor se hizo tomando como referencia el código ASME sección VIII considerándolo como un recipiente a presión interna.

Datos:

$D_{int} = 0.152''$ $S = 11,800$ Psi, esfuerzo máximo permisible.

$P_{op} = 850$ Psi. $E = 0.75$, eficiencia de soldadura.

$P_D = 3000$ Psi.

Para juntas circunferenciales y tubería sin costura.

$$t = PR / (2SE + 0.4P) = 3000 \text{ Psi} \cdot 0.076'' / (2 \cdot 11,800 \text{ Psi} \cdot 0.75 + 0.4 \cdot 3000 \text{ Psi})$$
$$t = 228 / (18900) = 0.013''$$

Para una tubería de diámetro nominal de $1/4''$ se tiene:

$D_{int} = 0.152''$

$D_{ext} = 0.25''$

Espesor = $0.049''$

Como se puede ver el espesor de la tubería es superior al necesario para el sistema propuesto, por lo que cumple con las características necesarias para el sistema.

3.2. – DIMENSIONAMIENTO DE LA RESISTENCIA ELECTRICA.

Con base a lo reportado por la literatura y a las condiciones de operación, se decidió que el elemento calefactor fuera una resistencia en forma de cartucho de alta concentración, realizándose los siguientes cálculos para determinar la potencia de la misma:

Si se estima la temperatura del agua de alimentación a CE-1 en 110°C (230°F), entonces

CAPITULO III

Datos:

$$Q = 60 \text{ g/min.} = 7.5 \text{ lb/h.}$$

$$T_1 = 110 \text{ }^\circ\text{C} = 230 \text{ }^\circ\text{F}$$

$$T_2 = 275 \text{ }^\circ\text{C} = 527 \text{ }^\circ\text{F}$$

$$P = 853 \text{ Psi.}$$

$$\lambda_{275 \text{ }^\circ\text{C}, 853 \text{ Psi}} = 650 \text{ Btu/lb}$$

Cálculo del calor sensible:

$$Q_s = mC_p\Delta T = (7.5 \text{ lb/h})(1 \text{ Btu/lb}^\circ\text{F})(527^\circ\text{F} - 230^\circ\text{F}) = 2,227.5 \text{ Btu/h.}$$

Cálculo del calor latente:

$$Q_l = (7.5 \text{ lb/h})(650 \text{ Btu/lb}) = 4,875 \text{ Btu/h}$$

$$Q_{\text{total}} = Q_s + Q_l = 7,102.5 \text{ Btu/h} = 2080 \text{ Watts}$$

Considerando las pérdidas totales de calor en CE-1 como 1000 Watts la potencia necesaria para la caldera será:

$$\text{Potencia} = Q_{\text{total}} + \text{Pérdidas} = 3080 \text{ Watts} = 7,102.5 \text{ Btu/h}$$

Por lo tanto se concluye que una resistencia de 3000 Watts cubre con los requerimientos de calor de la caldera.

Para las calderas de tubos de agua se tiene un flux típico de 30,000 Btu/h·ft² para la producción de 7,102.5 Btu/h se necesitará un área de:

$$A = Q/\text{flux} = (7,102.5 \text{ Btu/h}) / (30,000 \text{ Btu/h ft}^2) = 0.203 \text{ ft}^2$$

$$L = A / \pi D = 0.177 \text{ ft}^2 / (0.0833 \text{ ft} \cdot 3.14159) = 0.9 \text{ ft} = 10.8''$$

Para las siguientes dimensiones se especifica una resistencia tipo cartucho:

Diámetro = 1''

Largo = 10''

Servicios disponibles:

Voltaje = 220 Volts

2 fases.

3.3. – DISEÑO DE LA CALDERA EXPERIMENTAL.

3.3.1. – Selección de material y soldadura para CE-1.

El material metálico de construcción del recipiente generador de vapor se seleccionó de acuerdo a la normatización que rige la composición de estos materiales, Código ASME sección II, norma ASTM-A213/A213M-88, se consideró que CE-1 requiere soportar una presión mínima de 60 Kg/cm² y una temperatura de 275 °C y que debe ser similar al de los generadores industriales (acero al carbón), a continuación se muestra la composición química del metal base y la soldadura que se seleccionaron en el mercado.

Material	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo
Metal base AISI4140	0.4	0.88	0.25	0.015	0.03	0.95	0.079	0.2
Soldadura	0.1	0.5	0.19	0.02	0.02	1.4	1.05	0.5

El metal base AISI4140 comercialmente se conoce como aceros fortuna TCMO 4T.

Para la soldadura se utilizó el código ASME sección II, que indica para estas condiciones de operación una soldadura del tipo ferrítica, con las juntas unidas por doble soldadura; se especificó soldadura 8018.

Para el tubo de prueba, debido a que será nuestro testigo de prueba, deberá ser del mismo material que el utilizado para la construcción de los tubos de calderas industriales, entonces se especificó acero al carbón con la composición que se indicó en la tabla anterior como el metal base.

3.3.2. – Dimensionamiento de caldera experimental.

Para el dimensionamiento de la caldera se consideran cuatro partes, las cuales incluyen: El tubo de prueba, el cuerpo, el brazo y el tubo conector. Las cuales se esquematizan en la figura 3.1.

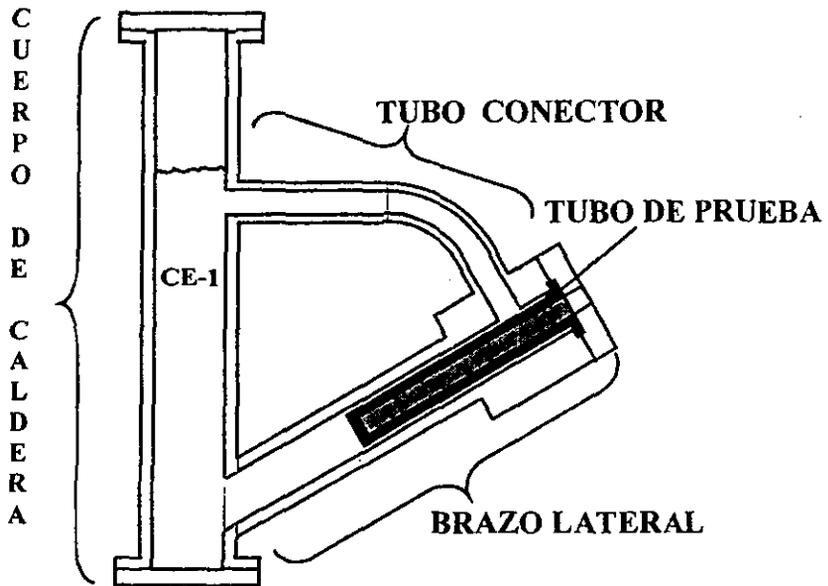
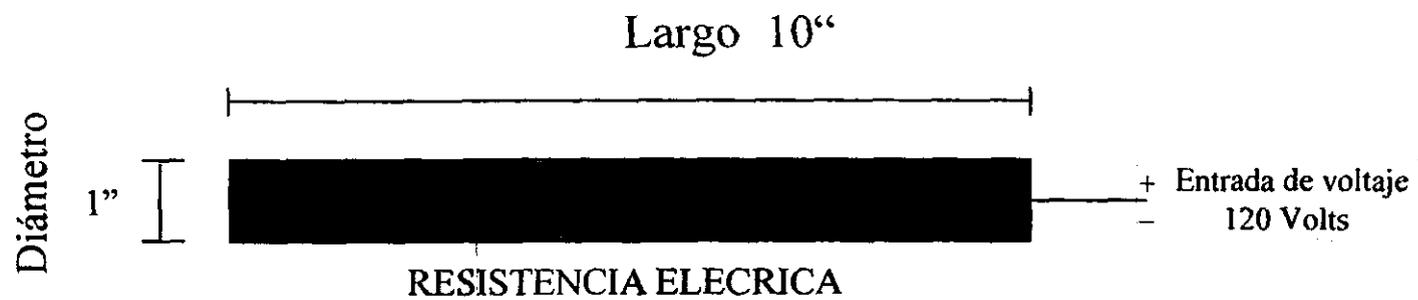
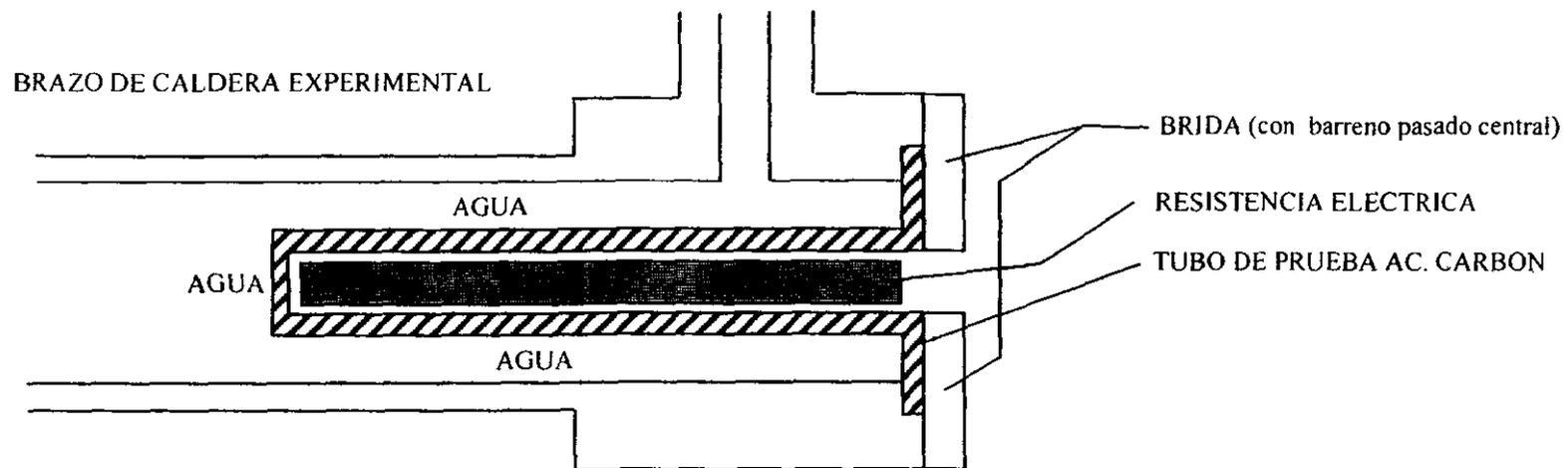


Figura 3.1 Esquemización de las partes principales de la caldera experimental.



DISEÑO:
HARRISON BERISTAIN CARLOS
MANCERA CORTÉS MARIO

REVISÓ: JESUS MARIN C.

APROBÓ: JESUS MARIN C.

CLIENTE: IMP

FECHA: 11/Ene/99



FIGURA 3.2.
DETALLE DE TUBO DE
PRUEBA Y RESISTENCIA
ELECTRICA DE CALDERA
EXPERIMENTAL

3.3.2.1.- Dimensionamiento del tubo de prueba.

Con las dimensiones de la resistencia eléctrica tipo cartucho de 10" de largo y 1" de diámetro, se tiene que el diámetro interno del tubo de prueba será entonces de 1" y el largo será de 10", hay que considerar que el tubo de prueba será el testigo de la velocidad de corrosión y de la incrustación que se encuentren en la zona de generación de vapor, por lo que el tubo de prueba deberá permanecer sumergido en el agua de caldera para llevar a cabo la evaporación, además de que debe ser intercambiable, esto es, una pieza independiente del equipo, por lo que el equipo CE-1 deberá de tener una brida con barrenado pasado de modo que se pueda sellar el interior de la caldera e introducir con facilidad la resistencia eléctrica, para detalles más precisos de la Forma y dimensiones del tubo de prueba ver figura 3.2.

3.3.2.2.- Dimensionamiento del brazo de CE-1.

Por lo común, las calderas de tubos de agua tienen un diámetro de entre 1.5" y 3" para los tubos de generación de vapor, para el sistema propuesto se seleccionó un $D_e = 1.5"$ para el tubo de prueba, con el espesor calculado en la sección 3.3.3.4 (espesor de 0.25") y un $D_{\text{externo}} = 1.5" = D_1$. (vea fig. 3.3)

Para el cálculo del diámetro interno del brazo de la caldera se calcula el diámetro equivalente al de un tubo de caldera.

$$\frac{\pi D_e^2}{4} = \frac{\pi D_2^2}{4} - \frac{\pi D_1^2}{4}$$

$$D_2^2 = D_e^2 + D_1^2$$

$$D_2 = \sqrt{D_e^2 + D_1^2} = \sqrt{1.5^2 + 1.5^2}$$

$$D_2 = \sqrt{2.25 + 2.25} = \sqrt{4.5} = 2.1"$$

$$D_{\text{interno tubo externo}} = 2.1"$$

$$D_{\text{nominal}} = 2"$$

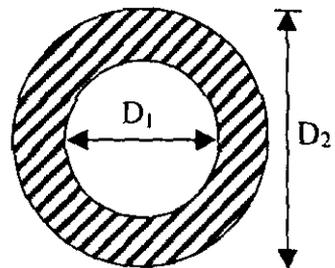


Figura 3.3. - Sección anular del brazo de la caldera.

Para evitar que el vapor se desvíe y ascienda al domo de vapor por el cuerpo de la caldera se le da una inclinación de 60° al brazo y una longitud total de 60% mayor que el largo del tubo de prueba, la longitud total será entonces de 16", vea la figura 3.4, en donde se muestran las dimensiones aquí calculadas.

3.3.2.3.- Dimensionamiento del tubo conector de CE-1.

Para el caso del tubo conector se desea trabajar en la zona de transición laminar - turbulenta por lo que $Re = 3000$.

Las propiedades del vapor a esas condiciones son:

$$P = 850 \text{ Psi.}$$

$$\mu = 1.8 \times 10^{-4} \text{ g/cm s}$$

$$T = 275 \text{ }^\circ\text{C.}$$

$$Q = 60 \text{ g/min.}$$

$$\rho = 0.029 \text{ g/cm}^3$$

$$D = 4Q / (\pi\mu Re)$$

$$D = 4(1 \text{ g/s}) / (\pi * 1.8 \times 10^{-4} \text{ g/cm s} * 3000) = 2.35 \text{ cm}$$

$$D = 0.93 \text{ in} \approx 1''$$

$$D_{\text{nominal}} = 1''$$

La longitud del tubo conector será tal que se pueda conectar al cuerpo de la caldera y al brazo de la misma, la salida del vapor del brazo de la caldera será al 70% de la longitud total de transferencia de calor, esta longitud será aproximadamente de 13.5", ver la figura 3.4.

3.3.2.4.- Dimensionamiento del cuerpo del equipo CE-1.

En base a que el diseño seleccionado de la caldera experimental y las características deseadas de la misma, las dimensiones de esta deberán de ser tales que se facilite la recirculación natural conforme se va presentando el cambio de fase del agua a vapor, por lo que en base al dimensionamiento del brazo lateral con un $D_{\text{int}} = 2''$, el cuerpo de la caldera CE-1 debe de tener un diámetro mayor de 2", para que se cumpla con esta premisa.

Además, las dimensiones se deben de considerar en base a que éste sea capaz de contener un volumen de 3 litros de agua, según reportes en la literatura, a fin de asegurar un tiempo de residencia de 1 hora aproximadamente, en base al flujo de vapor producido. Por lo tanto se eligió un $D_{int} = 3''$ para el cuerpo de CE-1.

Volumen de tubo conector:

$$V = \pi D^2 L / 4 = \pi (2.54 \text{ cm})^2 (34.29 \text{ cm}) / 4 = 174 \text{ cm}^3$$

Volumen del brazo:

$$V = \pi (5.08 \text{ cm})^2 (40.64 \text{ cm}) / 4 - \pi (1.5 \text{ cm})^2 (25.4 \text{ cm}) / 4 = 779 \text{ cm}^3$$

Volumen del cuerpo sin considerar la sección del domo de vapor:

$$V = 3000 - 174 - 779 = 2047 \text{ cm}^3$$

Altura del cuerpo sin considerar la sección del domo de vapor:

$$L = 4V / (\pi D^2) = 4 * 2047 \text{ cm}^3 / (\pi * (7.62 \text{ cm})^2) = 44.8 \text{ cm} \approx 17''$$

Para la sección de domo de vapor se considera suficiente con un 30% más de la altura calculada, entonces la altura total será (ver figura 3.4):

$$L_{TOTAL} = 22''$$

3.3.2.5.- Dimensionamiento de bridas y conexiones del equipo CE-1.

El equipo CE-1 tiene 3 bridas, una superior, una inferior y una lateral, las dimensiones serán de acuerdo a las dimensiones del brazo y del cuerpo de la caldera. Para las dimensiones de las bridas de CE-1 ver la figura 3.5. Para el cálculo del diámetro de las bridas se utiliza la siguiente ecuación:

$$D = d + 4d_T$$

Donde:

D = diámetro de la brida, in.

d = diámetro externo del cuerpo, in.

d_T = diámetro de tornillo, in. (Según E. Meggesy).

CAPITULO III

Para la tapa superior e inferior de CE-1:

Datos:

$$d = 4''$$

$$d_T = \frac{1}{2}''$$

$$D = 4 + 4 * \frac{1}{2} = 6''$$

Para la tapa lateral de CE-1:

Datos:

$$d = 3''$$

$$d_T = \frac{1}{2}''$$

$$D = 3 + 4 * \frac{1}{2} = 5''$$

La caldera experimental deberá tener las siguientes conexiones y barrenos:

a) Brida superior.

- 1.- Válvula de seguridad.
- 2.- Salida de vapor.
- 3.- Salida para transmisor de nivel.
- 4.- Salida para vidrio de nivel.
- 5.- Termopozo.
- 6.- Salida para manómetro.
- 7.- Ocho barrenos para sujeción según E. Meggesy.

b) Brida inferior.

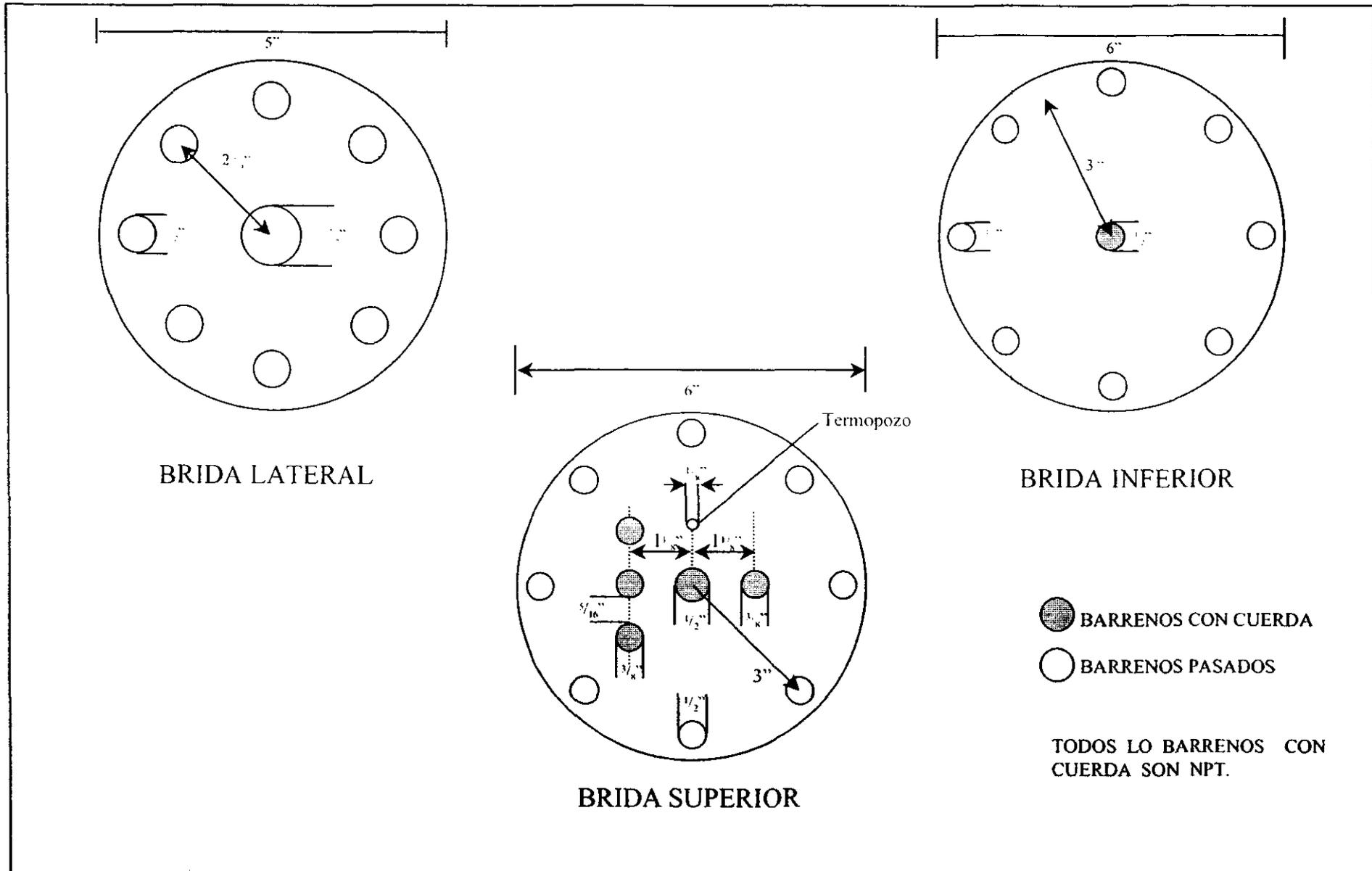
- 1.- Salida de lodos.
- 2.- Salida para transmisor de nivel.
- 3.- Salida para vidrio de nivel.
- 4.- Ocho barrenos para sujeción según E. Meggesy.

c) Brida lateral.

- 1.- Barreno pasado para acceso de la resistencia.
- 2.- Ocho barrenos para sujeción según E. Meggesy.

d) Cuerpo de CE-1.

- 1.- Entrada del agua de alimentación.
- 2.- Salida de purga continua.
- 3.- Ocho barrenos para sujeción según E. Meggesy.



DISEÑO: HARRISON BERISTAIN CARLOS MANCERA CORTÉS MARIO	REVISÓ: JESUS MARIN C.		FIGURA 3.5. DIAGRAMA DE BRIDAS DEL RECIPIENTE CE-1
	APROBÓ: JESUS MARIN C.		
	CLIENTE: IMP		
	FECHA: 11/Ene/99		

DIMENSIONAMIENTO DEL EQUIPO.

Todas las conexiones serán ¼" NPT. La Salida del vapor será de ½" NPT y para el termo pozo se especificó de 1/8". Todas las dimensiones se indican en la figura 3.5.

3.3.3.- Cálculo de espesores de caldera experimental.

Para el cálculo de los espesores del equipo CE-1 se utilizó como referencia al código ASME Recipientes a presión y calderas, sección I parte PEB y sección VIII.

3.3.3.1.- Cálculo de espesor del cuerpo de CE-1.

Recipiente CE-1 sometido a presión interna.

Presión de diseño:	3000 psig
Temperatura de diseño:	750°F
Radio interno:	1.5 in
Material:	Aceros Fortuna TCMO4T AISI4140
Presión de operación:	850 Psig
Temp. de operación:	527 °F = 275°C
Considerando E=0.75	

De la subsección C del código ASME se obtiene el valor del esfuerzo máximo permisible para el material especificado.

$S = 22,500$ Psig.

Por lo tanto:

$$t = \frac{PR}{(2SE + 0.4 P)}$$

$$t = \frac{3,000 * 0.5}{(2(22,500)(0.75) + 0.4(3,000))} = 0.1287 \text{ in} \approx 1/8''$$

Dimensionalmente:

$$[\text{in}] = \frac{\text{Psig} * (\text{in})}{\text{Psig} + \text{Psig}} = [\text{in}] \text{ (de acuerdo al ASTM Boiler and Pressure Vessel code).}$$

Dado que las velocidades de corrosión a las condiciones de operación, se espera que sean altas, se especifica un espesor por corrosión de 3/8", entonces se tiene un espesor total de:

$$t = 0.1287'' + 0.375'' = 0.5''$$

Por lo tanto, un espesor de 1/2" es adecuado para esta parte del equipo.

3.3.3.2.- Cálculo de espesor del brazo de CE-1.

$$t = \frac{PR}{(2SE + 0.4 P)}$$

Para los mismos datos de diseño del cuerpo de CE-1 y para un R = 1.0 in se tiene:

$$t = \frac{3,000 * 1.0}{(2(22,500)(0.75) + 0.4(3,000))} = 0.0858 \text{ in } \approx 5/64''$$

Considerando un espesor por corrosión de 3/8" se tiene un espesor total de:

$$t = 0.0858'' + 0.375'' = 0.4608''$$

Por lo tanto un espesor de pared de 1/2" es adecuado para el brazo

3.3.3.3.- Cálculo de espesor del tubo conector de CE-1.

Para el tubo de ascenso de vapor se tiene:

$$t = \frac{PR}{(2SE + 0.4 P)}$$

Para los mismos datos de diseño del cuerpo de CE-1 y para un R = 0.5 in se tiene:

$$t = \frac{3,000 * 0.5}{(2(22,500)(0.75) + 0.4(3,000))} = 0.043 \text{ in } \approx 3/64''$$

Considerando un espesor por corrosión de 1/4" se tiene un espesor total de:

$$t = 0.043'' + 0.25'' = 0.293''$$

DIMENSIONAMIENTO DEL EQUIPO.

Por lo tanto un espesor de pared de $5/16'' = 0.3125''$ es adecuado para este tubo.

3.3.3.4.- Cálculo de espesor del tubo de prueba.

Para el cálculo del tubo de prueba se le considera como un recipiente sometido a presión externa.

Considerando un $t = (3/16'') = 0.1875''$, por lo tanto:

D_i = Diámetro interno = $1''$ De la sección 3.2.

D_o : Diámetro externo supuesto del tubo = $1.375''$.

$D_o/t = (1'' + 2 * 0.1875'') / 0.1875 = 1.375'' / 0.1875'' = 7.3 < 10$

$L/D_o = 10'' / 1.375'' = 7.27$

De la tabla 5-UGO - 28.0 (ver anexo C)

factor A = 0.025

Para una presión mínima de cedencia de 95000 Psig y una temperatura de diseño de 750°F, de la gráfica 5-UCS-28.1 se tiene: factor B = 11,000 (ver anexo C.)

Máxima presión externa permitida (P_a).

$$P_a = \frac{4B}{3(D_o/t)} = \frac{4 * 11,000}{3 * (7.3)} = 2,009 \text{ Psi}$$

$P_{\text{Diseño}} = 2,000 \text{ Psi}$.

Como $P_a > P_{\text{Diseño}}$ ($2009 > 2000$) entonces $t = 0.1875''$ ($3/16''$) es un espesor adecuado para el tubo de prueba.

Considerando un espesor de corrosión mínimo de $1/16''$ se tiene:

$$t = 0.1875'' + 0.0625'' = 0.25'' \text{ (1/4'')}$$

Entonces para el tubo de prueba se especificó un espesor de $1/4'' = 0.25''$ que como muestran los cálculos anteriores es adecuado para dicho tubo.

3.3.3.5.- Cálculo de espesor de bridas de CE-1.

Para esta sección se utilizó el método ASME sección VIII para recipientes a presión, considerando tapas circulares.

El espesor mínimo requerido para tapas circulares está dado por:

$$t = d \sqrt{\frac{CP}{SE}}$$

Donde:

t= Espesor de brida.

d= diámetro del cuerpo, 3".

P = Presión de diseño, 3000 Psi.

S = 22,500 Psi.

E = Eficiencia de soldadura, 0.75.

C = 0.33 para tapas circulares con continuación de envolvente.

Para la tapa superior e inferior de CE-1 se tiene:

$$t = 3 \sqrt{\frac{(0.33)(3000)}{(22,500)(0.75)}} = 0.7266''$$

Considerando un espesor de corrosión mínimo de 3/8"(0.375") se tiene:

$$t_r = 0.7266'' + 0.375'' = 1.10''$$

Por lo tanto un espesor de 1" es un espesor adecuado para estas tapas.

Para la tapa lateral con un d = 2" un espesor de 1" es adecuado.

3.4.- DISEÑO DEL DEAERADOR.

Para llevar a cabo el dimensionamiento del deaerador, el cálculo se realizó en 2 partes, la primera fue la sección de balance, cuyas funciones son: contener el líquido que viene de la sección de contacto, prevenir la cavitación de la bomba B-2 y llevar a cabo el mezclado del secuestrante de oxígeno con el agua deaerada. La otra parte es el cálculo de la sección de contacto en donde se lleva a cabo la transferencia de masa. En la figura 3.6 se muestran las secciones de las que se hace mención.

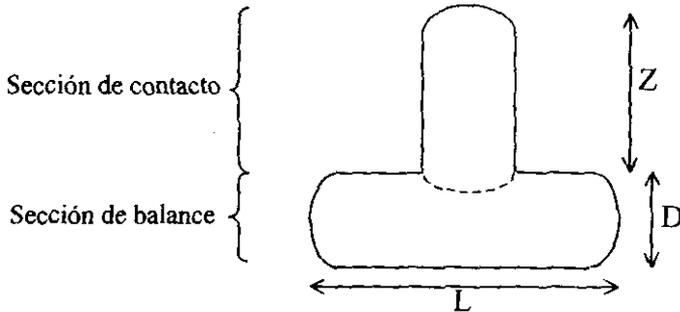


Fig. 3.6. Secciones del tanque TM-1.

3.4.1.- Dimensionamiento de TM-1.

Debido a que en el recipiente TM-1 se llevará a cabo la deaeración, el volumen total del recipiente debe ser lo suficientemente pequeño para evitar condensaciones de vapor antes de que realice la deaeración y garantizar la salida del mismo promoviendo el arrastre del O_2 y del CO_2 disueltos en el agua de repuesto.

3.4.1.1. - Sección de balance.

Para el cálculo de la sección de balance se utilizó el método recomendado por el "Heat Exchange Institute" el cual se basa en garantizar el suministro de agua a la caldera por cierto tiempo en el caso de que se presente alguna falla técnica que impida el suministro de agua al deaerador.

Se tiene como tiempo de residencia recomendado 20 minutos por lo que la sección de balance deberá ser capaz de proporcionar agua por 20 minutos. Con el fin de poder llevar a cabo una buena integración del secuestrante de oxígeno se fija un $L/D = 1.5$.

A continuación se presenta la memoria de cálculo.

DATOS: $t_R = 20$ min.

$$L/D = 1.5$$

$$G = 60 \text{ g/min.}$$

$$\rho = 1 \text{ g/cm}^3$$

$$\% \text{ volumen líquido} = 95\%$$

Volumen del líquido a 95% de capacidad.

$$V = 20 \text{ min.} \left(\frac{60 \text{ cm}^3}{\text{min.}} \right) = 1200 \text{ cm}^3 \text{ al } 95\%.$$

$$V_T = 1260 \text{ cm}^3 \text{ al } 100\%$$

$$V_{\text{cilindro}} = \frac{\pi D^2 L}{4}$$

Sustituyendo la equivalencia de L/D , se tiene:

$$V_{\text{cilindro}} = \frac{1.5 \pi D^3}{4}$$

Despejando D , se tiene:

$$D = \sqrt[3]{\frac{4V_{\text{cilindro}}}{1.5\pi}}$$

$$D = \sqrt[3]{\frac{4(1260)}{1.5\pi}} = 10.2 \approx 4''$$

$$L = 1.5 D = 1.5 (10) = 15 \text{ cm.}$$

3.4.1.2.- Sección de contacto.

El vapor se pondrá en contacto con el agua de repuesto para llevar a cabo la transferencia de masa. En los equipos industriales comúnmente se utiliza una columna de platos o empacada para llevar a cabo dicho proceso, pero en el caso del sistema propuesto, llevar a cabo este proceso por medio de una columna de platos o empacada no resultaría práctico, por lo que se optó por diseñar un equipo que incremente el área de transferencia de masa y disminuya la resistencia a la transferencia de masa en el líquido sin que se requieran muchos internos que compliquen su diseño.

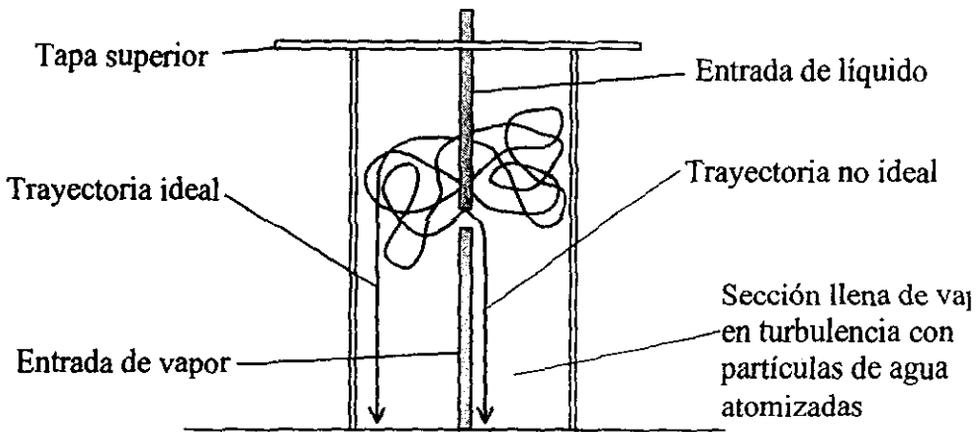


Fig. 3.7. Esquema de la sección de contacto.

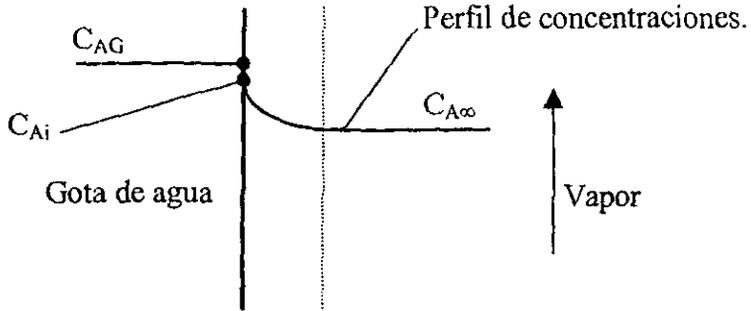
Por estas razones se diseñó una sección de contacto que fraccione el líquido en partículas pequeñas y que a su vez favorezca la transferencia de masa. Esta sección se muestra en el esquema de la figura 3.7 en donde se indica la zona en donde se da el contacto entre las dos fases.

Cada gota, producto de la atomización, puede tener una trayectoria aleatoria (marcada como trayectoria ideal), mientras que algunas presentarán trayectorias como lo señala la trayectoria no ideal de la figura 3.7, en la cual se da la menor transferencia de masa, por lo

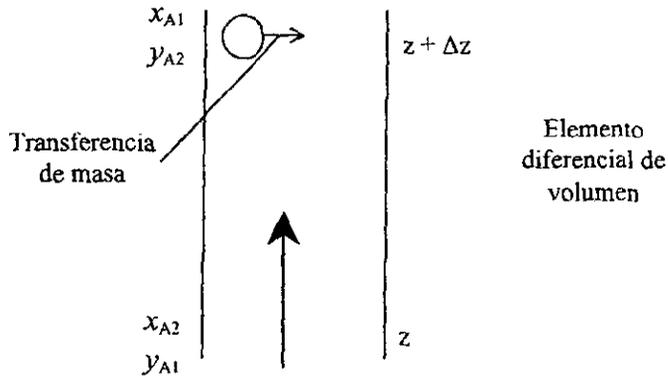
CAPITULO III

que en base a ella se determinan las dimensiones de la sección de contacto.

El esquema de transferencia de masa será entonces el siguiente:



Realizando un balance de masa en base al oxígeno disuelto en un elemento diferencial de volumen $A_s \Delta Z$ de la sección de contacto, se tiene:



$$\left(\text{Flujo molar de soluto que entra en } z \right) - \left(\text{Flujo molar de soluto que sale en } z + \Delta z \right) - \left(\text{Flujo molar de soluto transferido del gas al líquido} \right) = 0 \quad (3.1)$$

Dicho de otra manera:

$$A_s G_T y_A|_z - A_s G_T y_A|_{z+\Delta z} - N_A a (A_s \Delta z) = 0 \quad (3.2)$$

Donde:

A_s = Area superficial de transferencia de masa.

G_T = Flujo molar de vapor.

Δz = Incremento de altura.

N_A = Velocidad de transferencia de masa por unidad de área.

a = Area superficial, (cm^2 de área de transferencia de masa/ cm^3 de volumen del sistema).

$y_A|_z$ = Fracción mol de oxígeno en el vapor en z

$y_A|_{z+\Delta z}$ = Fracción mol de oxígeno en el vapor en $z + \Delta z$

Para este caso se estima la tasa de transferencia de masa como sigue:

$$N_A = KcC(y_{Ai} - y_A) \quad (3.3)$$

Donde:

Kc = Coeficiente de transferencia de masa.

C = Densidad molar.

y_{Ai} = Fracción molar en la interfase, en equilibrio con x_A .

Sustituyendo la ecuación 3.3 en la ecuación 3.2 se tiene:

$$A_s G_T y_A|_z - A_s G_T y_A|_{z+\Delta z} - Kc a C (y_{Ai} - y_A) (A_s \Delta z) = 0 \quad (3.4)$$

Dividiendo entre $A_s \Delta z$ y tomando el lim. $\Delta z \rightarrow 0$.

$$G_T \frac{dy_A}{dz} = aCKc(y_{Ai} - y_A)$$

Despejando variables:

$$\int_0^z dz = \frac{G_T}{aCKc} \int_{y_{A1}}^{y_{A2}} \frac{dy_A}{y_{Ai} - y_A}$$

CAPITULO III

Al integrar esta ecuación se puede calcular la altura deseada.

$$z = \frac{G_T}{aCKc} \int_{y_{A1}}^{y_{A2}} \frac{dy_A}{y_{A1} - y_A} \quad (3.5)$$

A continuación se explica como se estiman cada uno de los componentes de la anterior ecuación.

La integral del lado derecho de la anterior ecuación generalmente se obtiene por métodos numéricos, debido a la ausencia de modelos para la predicción de propiedades de fases en equilibrio, pero para el presente caso y dadas las bajas concentraciones del oxígeno disuelto y a las presiones y temperaturas moderadas se utiliza la ley de Raoult como predictor de la relación $x - y$, de la cual se obtiene una recta.

$y_i P_T = x_i P_{vi}$ Donde:

P_T = Presión total del sistema. = $3 \text{ Kg/cm}^2 = 2.9 \text{ atm} = 2206.5 \text{ mmHg}$.

P_{vi} = Presión de vapor del compuesto i .

y_i, x_i = Fracciones mol del componente i en fase gas y líquida respectivamente.

A = Oxígeno.

$T = 110 \text{ }^\circ\text{C} = 383 \text{ K}$

De la ecuación de Rault se tiene:

$$y_i = \frac{P_{vi}}{P_T} x_i$$

A las condiciones de operación el oxígeno tiene una presión de vapor de $699,093.53 \text{ mmHg}$

Por lo tanto la ecuación de equilibrio para el sistema propuesto es:

$$y_i = \frac{699,093.53 \text{ mmHg}}{2206.5 \text{ mmHg}} x_i$$

Simplificando:

$$y_{Ai} = 316.83 x_{Ai} \quad (3.6)$$

DIMENSIONAMIENTO DEL EQUIPO.

La anterior ecuación define la concentración de oxígeno en la interfase y describe la curva de equilibrio.

Para el cálculo de la curva de operación se realiza un balance de masa global al sistema para lo cual se tienen los siguientes datos:

Datos:

Flujo de agua = 60 g/min.

Fraciones masa:

$$X_{A1} = 4 \times 10^{-6}$$

$$X_{A2} = 2 \times 10^{-7}$$

$$Y_{A1} = 0$$

Fraciones mol:

$$x_{A1} = 2 \times 10^{-6}$$

$$x_{A2} = 1 \times 10^{-7}$$

$$y_{A1} = 0$$

Masa total transferida:

$$60 \text{ g/min. } (4 \times 10^{-6} - 2 \times 10^{-7}) = 2.28 \times 10^{-4} \text{ g/min.}$$

Cálculo de la fracción mol:

$$Y_{A2} = (2.28 \times 10^{-4} \text{ g/min.}) / (60 \text{ g/min.}) = 3.8 \times 10^{-6} \text{ fracción masa}$$

$$y_{A2} = 1.9 \times 10^{-6} \text{ fracción mol}$$

Con los datos anteriores se determina la curva de operación la cual es la siguiente:

$$(y_A - y_{A1}) = \frac{y_{A2} - y_{A1}}{x_{A2} - x_{A1}} (x_A - x_{A1})$$

La cual genera la curva de operación:

$$y_A = x_A - 1 \times 10^{-7} \quad (3.7)$$

Con las ecuaciones 3.6 y 3.7 se sustituyen en la integral del lado derecho de la ecuación 3.5 y se obtiene lo siguiente:

$$\begin{aligned} y_{Ai} - y_A &= 316.83x_A - x_A + 1 \times 10^{-7} \\ y_{Ai} - y_A &= 315.83x_A + 1 \times 10^{-7} \end{aligned} \quad (3.8)$$

De la ecuación 3.7 se tiene:

$$x_A = y_A + 1 \times 10^{-7} \quad (3.9)$$

Sustituyendo 3.9 en 3.8 se tiene:

$$y_{Ai} - y_A = 315.83(y_A + 1 \times 10^{-7}) + 1 \times 10^{-7} \quad (3.10)$$

$$y_{Ai} - y_A = 315.83y_A + 3.1683 \times 10^{-5} \quad (3.11)$$

Al sustituir 3.11 en la integral de la ecuación 3.5 se tiene:

$$\int_{y_{A1}}^{y_{A2}} \frac{dy_A}{y_{Ai} - y_A} = \int_{y_{A1}}^{y_{A2}} \frac{dy_A}{315.83y_A + 3.1683 \times 10^{-5}} =$$

$$\int_{y_{A1}}^{y_{A2}} \frac{dy_A}{y_{Ai} - y_A} = \frac{1}{315.83} \ln (315.83 y_A + 3.1683 \times 10^{-5}) \Bigg|_{y_{A1}}^{y_{A2}}$$

Evaluando la integral entre los límites y_{A1} y y_{A2} se tiene:

$$\int_{y_{A1}}^{y_{A2}} \frac{dy_A}{y_{Ai} - y_A} = \frac{1}{315.83} \ln \frac{(315.83 y_{A2} + 3.1683 \times 10^{-5})}{(315.83 y_{A1} + 3.1683 \times 10^{-5})} = 9.47 \times 10^{-3}$$

Para el cálculo del coeficiente de transferencia de masa K_c se estima por medio de la analogía de Chilton - Colburn.

$$\frac{C_f}{2} = \frac{K_c}{v} Sc^{(2/3)}$$

Donde:

v = Velocidad lineal del vapor, cm/s.

Sc = Número de Schmidt = $\mu_{vapor} / (\rho_{vapor} \cdot D_{AB})$, adimensional

C_f = Factor de fricción, adimensional, ref. 3 fig. 6.3-1.

Datos:

$$P = 3 \text{ Kg/cm}^2 = 2.9 \text{ atm.}$$

$$T = 110 \text{ }^\circ\text{C} = 383 \text{ K}$$

$$\mu_{vapor} = 0.004 \text{ g/cm}\cdot\text{s}$$

$$\rho_{vapor} = 0.0016 \text{ g/cm}^3$$

$$D_{AB} = 1.68 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$$

DIMENSIONAMIENTO DEL EQUIPO.

Con el fin de que se lleve a cabo un adecuado ajuste de las secciones de contacto y de balance, el diámetro de la sección de balance ($D = 4''$) deberá ser mayor que el de la sección de contacto por lo que se determina como diámetro de la sección de contacto de $3''$, con este diámetro se determina la velocidad lineal.

Para un diámetro de $3'' = 7.5 \text{ cm}$ se tiene un área transversal al flujo de $A = 44.17 \text{ cm}^2$

$$v = \frac{60 \text{ g}}{\text{min.}} \left(\frac{\text{min}}{60 \text{ s}} \right) \left(\frac{\text{cm}^3}{0.0016 \text{ g}} \right) (44.17 \text{ cm}^2)^{-1} = 14 \text{ cm/s}$$

$$\text{Re} = \frac{(0.0016 \text{ g/cm}^3)(7.5 \text{ cm})(14 \text{ cm/s})}{(0.004 \text{ g/cm}\cdot\text{s})} = 42$$

Para $\text{Re} = 42$ corresponde un $C_f = 5$

$$\text{Sc} = \frac{(0.004 \text{ g/cm}\cdot\text{s})}{(0.9794 \text{ g/cm}^3)(1.68 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s})} = 148,809.5$$

Sustituyendo los valores calculados en la ecuación 3.13 se tiene:

$$\text{Kc} = (C_f/2) v (\text{Sc})^{-2/3} = (5/2)(14 \text{ cm/s})(148,809.5)^{-2/3} = 0.012 \text{ cm/s}$$

Para el área superficial por unidad de volumen se tiene como una aproximación la ecuación de Ergun:

$$a = \frac{6(1-\varepsilon)}{d_p}$$

Donde:

a = Área superficial, (cm^2 de área de transferencia de masa/ cm^3 de volumen del sistema).

ε = fracción de volumen vacío [=] cm^3 vacío/ cm^3 de volumen de empaque.

d_p = Diámetro promedio de partícula, cm.

CAPITULO III

Para el agua atomizada en la sección de contacto se considera $\varepsilon = 0.95$ (como en el empaque pall ring), además de un $d_p = 0.25$ cm (aproximadamente).

$$a = 6(1-0.95)/0.25 \text{ cm} = 1.2 \text{ cm}^{-1}$$

Dada la presión que se maneja, la densidad molar se determina con la ecuación de gas ideal:

$$C = \frac{P}{RT} = \frac{2.9 \text{ atm}}{(82.06 \text{ cm}^3 \cdot \text{atm/mol} \cdot \text{K})(383 \text{ K})} = 9.2 \times 10^{-5} \text{ mol/cm}^3$$

$$G_T = \frac{60 \text{ g}}{\text{min.}} \left(\frac{1 \text{ min.}}{60 \text{ s}} \right) \left(\frac{1 \text{ mol}}{18 \text{ g}} \right) \left(\frac{4}{\pi(7.62 \text{ cm})^2} \right) = 1.21 \times 10^{-3} \text{ mol/cm}^2 \cdot \text{s}$$

Hasta aquí se tienen todos los factores de la ecuación 3.5, sustituyéndolos en dicha ecuación se tiene:

$$z = \frac{(1.21 \times 10^{-3} \text{ mol/cm}^2 \cdot \text{s})(9.47 \times 10^{-3})}{(1.2 \text{ cm}^{-1})(9.2 \times 10^{-5} \text{ mol/cm}^3)(0.012 \text{ cm/s})} = 9 \text{ cm}$$

Debido a que la altura que se acaba de calcular (z) es sólo la altura medida desde la salida del líquido hasta la base de la sección de contacto, no se consideran las partículas que siguen una trayectoria marcada como ideal en la figura 3.7, por lo que la altura total de la sección de contacto será el doble de lo que se calculó considerando solamente la trayectoria no ideal, así también se cubre la transferencia de masa de las partículas que siguen la trayectoria ideal, quedando el valor de $z = 18$ cm. Todas las dimensiones para el TM-1 que se calcularon se encuentran señaladas en la figura 3.8.

3.4.1.3. Dimensionamiento de bridas.

El equipo TM-1 tiene 3 bridas, una superior y dos laterales, las dimensiones serán de acuerdo a las dimensiones de la sección de balance y de la sección de contacto. Para las dimensiones de las bridas de TM-1 vea la figura 3.9. Para el cálculo del diámetro de las bridas se utiliza la siguiente ecuación:

$$D = d + 4d_T$$

Donde:

D = diámetro de la brida, in.

d = diámetro externo del cuerpo, in.

d_T = diámetro de tornillo, in.

Para la tapa superior de TM-1:

Datos:

$$d = 3\frac{3}{8}''$$

$$d_T = \frac{1}{2}''$$

$$D = 3\frac{3}{8} + 4 * \frac{1}{2} = 5\frac{3}{8}''$$

Para las tapas laterales de TM-1:

Datos:

$$d = 4\frac{3}{8}''$$

$$d_T = \frac{1}{2}''$$

$$D = 4\frac{3}{8} + 4 * \frac{1}{2} = 6\frac{3}{8}''$$

3.4.2. Selección del material para TM-1.

Debido a que se requiere la mayor durabilidad del equipo TM-1, dadas las condiciones corrosivas del sistema, el material que se seleccionó para TM-1 es acero inoxidable 304.

3.4.3. – Cálculo del espesor de TM-1.

El cálculo del espesor de TM-1 se realizó con base al código ASME sección VIII, como recipiente a presión interna, envolvente cilíndrica y esfuerzos longitudinales.

CAPITULO III

Datos:

$$P_{op} = 3 \text{ Kg/cm}^2 = 42.7 \text{ Psi}$$

$$P = 42.7 \text{ Psi} + 30 \text{ Psi} = 73 \text{ Psi.}$$

Según el Heat Exchange Institute la presión de diseño estándar será de 100 Psi.

$$P = 100 \text{ Psi}$$

$$t_{\text{corrosión min.}} = 1/16''$$

$$T_{op} = 162 \text{ }^\circ\text{C.}$$

$$T_D = 162 \text{ }^\circ\text{C} + 15 \text{ }^\circ\text{C} = 180 \text{ }^\circ\text{C} = 356 \text{ }^\circ\text{F}$$

$$S = 11,300 \text{ Psi}$$

$$E = 0.75$$

$$t = \frac{PR}{2SE + 0.4P}$$

$$t = \frac{(100 \text{ Psi})(2'')}{2(20,000 \text{ Psi})(0.75) + 0.4(100 \text{ Psi})} = 0.0066''$$

Al agregar el espesor mínimo por corrosión se tiene un espesor total de:

$$t = 0.0066'' + 0.0625'' = 0.0691''$$

Por lo tanto un espesor de $3/16'' = 0.1875''$ es adecuado para estas condiciones de operación.

3.4.4. – Cálculo de espesor de las bridas de TM-1.

Para esta sección se siguió el mismo procedimiento que en la sección 3.3.3.5.

El espesor mínimo requerido para tapas circulares está dado por:

$$T = d \sqrt{\frac{CP}{SE}}$$

Donde:

t= Espesor de brida.

d= diámetro del cuerpo, 4".

P = Presión de diseño, 100 Psi.

S = 11,300 Psi.

E = Eficiencia de soldadura, 0.75.

C = 0.33 para tapas circulares con continuación de envolvente.

Para las tapas laterales de TM-1 se tiene:

$$t = 4 \sqrt{\frac{(0.33)(100)}{(11,300)(0.75)}} = 0.2496''$$

Considerando un espesor mínimo por corrosión de 1/16"(0.0625") se tiene:

$$t_r = 0.2496'' + 0.0625'' = 0.3121''$$

Por lo tanto un espesor de 5/16"(0.3125") es un espesor adecuado para estas tapas.

Para la tapa superior con un d = 3" un espesor de 5/16"(0.3125") es adecuado.

3.5. – DISEÑO SERPENTINES DE ENFRIAMIENTO.

El material seleccionado para los condensadores fue tubo de cobre en la parte exterior y tubo de acero inoxidable 316 de ¼" para la parte interior, el dimensionamiento del espesor de la tubería interna para los serpentines se realizó en la sección 3.1.3 y para el tubo de cobre se utiliza el espesor comercial debido a que esta tubería no soportará ninguna presión interna o externa.

3.5.1.– Dimensionamiento de EM-3.

En el caso del serpentín EM-3 se transferirá calor tanto sensible como latente, esto es una mayor cantidad de calor a remover que con EM-2 o EM-4.

CAPITULO III

Datos:

Material: Tubo de acero inoxidable 316, $\frac{1}{4}$ ".

$$d_e = 0.25'' = 0.0208333 \text{ ft}$$

$$d_i = 0.152'' = 0.012666 \text{ ft}$$

$$e = 0.049'' = 0.00408333 \text{ ft}$$

$$\lambda_{T=275^\circ\text{C}, P=853 \text{ Psi.}} = 650 \text{ Btu/lb.}$$

Temperaturas:

$$\text{Lado Vapor de entrada} = 275^\circ\text{C} = 527^\circ\text{F}$$

$$\text{Lado Vapor de salida} = 50^\circ\text{C} = 122^\circ\text{F}$$

$$\text{Lado Agua de entrada} = 30^\circ\text{C} = 86^\circ\text{F}$$

$$\text{Lado Agua de salida} = 40^\circ\text{C} = 104^\circ\text{F}$$

Flujo másico (M) vapor:

$$(M)_{\text{vapor}} = 60 \text{ g/min.} = 0.124 \text{ lb/min.}$$

Calor a remover:

$$Q = MC_p\Delta T + \lambda M$$

$$Q = 0.124 \text{ lb/min.} (1 \text{ Btu/lb}^\circ\text{F})(405^\circ\text{F}) + 650 \text{ Btu/lb} (0.124 \text{ lb/min.})$$

$$Q = 130.82 \text{ Btu/min.} = 2.18 \text{ Btu/s}$$

Flujo másico (m) agua:

$$Q = mC_p\Delta T$$

$$m = 130.82 \text{ Btu/min.} [(1 \text{ Btu/lb}^\circ\text{F})(18^\circ\text{F})]$$

$$m = 7.2677 \text{ lb/min.} = 3296.66 \text{ g/min.}$$

$$\text{considerando } \rho = 1.0 \text{ g/ml}$$

$$\text{Flujo volumétrico } v = 3.29666 \text{ litros/min.}$$

Coefficientes de película lado vapor

Volumen específico de vapor a 870 Psig y 527 °F

$$v = 0.5221 \text{ ft}^3/\text{lb}$$

Flujo volumétrico vapor.

$$V = M(v)$$

$$V = 0.124 \text{ lb/min. } (0.5221 \text{ ft}^3/\text{lb}) = 0.0647 \text{ ft}^3/\text{min}$$

$$V = 0.001079 \text{ ft}^3/\text{s}$$

$$\mu = 0.188 \times 10^{-4} \text{ lb/ft}\cdot\text{s}$$

$$\rho = 1.91 \text{ lb/ft}^3$$

$$Q = 2.18 \text{ Btu/s}$$

$$C_p = 0.454 \text{ Btu/lb } ^\circ\text{F}$$

$$K_{\text{vapor}} = 0.64 \times 10^{-5} \text{ Btu/s ft } ^\circ\text{F}$$

Temperaturas:

$$\text{Fluido caliente (vapor)} \quad T_1 = 527 \text{ F, } T_2 = 122 \text{ F}$$

$$\text{Fluido frío (agua)} \quad t_1 = 86 \text{ F, } t_2 = 104 \text{ F}$$

$$Re = \frac{4V\rho}{\pi d_i \mu} = \frac{4(0.001079 \text{ ft}^3/\text{s})(1.91 \text{ lb/ft}^3)}{\pi(0.012666 \text{ ft})(0.188 \times 10^{-4} \text{ lb/ft}\cdot\text{s})} = 11,019$$

$$Pr = \frac{\mu C_p}{K} = \frac{(0.188 \times 10^{-4} \text{ lb/ft}\cdot\text{s})(0.454 \text{ Btu/lb } ^\circ\text{F})}{0.64 \times 10^{-5} \text{ Btu/s ft } ^\circ\text{F}} = 1.3336$$

$$Nu = 0.027 (Re)^{0.8} (Pr)^{(1/3)}$$

$$Nu = 0.027(11019)^{0.8}(1.3336)^{(1/3)} = 0.027 * 1712.828 * 1.1007158$$

$$Nu = 50.90$$

$$h_i = Nu K / d_i$$

$$h_i = (50.90)(0.64 \times 10^{-5} \text{ Btu/s ft } ^\circ\text{F}) / (0.012666 \text{ ft})$$

$$h_i = 0.02572 \text{ Btu/ft}^2 \cdot \text{F s}$$

Coefficiente de película lado agua

Flujo volumétrico (v)

$$v = 3296.66 \text{ cm}^3/\text{min.} [1 \text{ ft}^3 / (30.48 \text{ cm})^3] (1 \text{ min}/60 \text{ s})$$

$$v = 0.00194 \text{ ft}^3/\text{s}$$

$$k = 0.988 \times 10^{-4} \text{ Btu/ft } ^\circ\text{F s}$$

$$\rho = 62.37 \text{ lb/ft}^3$$

$$d_{eq} = (d_2^2 - d_c^2) / d_c$$

$$d_{eq} = (0.041666^2 - 0.0208333^2) / 0.0208333 = 0.06249 \text{ ft.}$$

$$\mu = 5.38 \times 10^{-4} \text{ lb/ft s}$$

$$C_p = 1 \text{ Btu/ft } ^\circ\text{F}$$

CAPITULO III

$$Re = \frac{4V\rho}{\pi d_{eq}\mu} = \frac{4(0.00194 \text{ ft}^3/\text{s})(62.37 \text{ lb}/\text{ft}^3)}{\pi(0.06249 \text{ ft})(5.38 \times 10^{-4} \text{ lb}/\text{ft s})} = 4,582$$

$$Pr = \frac{\mu C_p}{k} = \frac{(5.38 \times 10^{-4} \text{ lb}/\text{ft s})(1 \text{ Btu}/\text{lb } ^\circ\text{F})}{0.988 \times 10^{-4} \text{ Btu}/\text{ft } ^\circ\text{F s}} = 5.4453$$

$$Nu = 0.027 (Re)^{0.8} (Pr)^{(1/3)}$$

$$Nu = 0.027 (4582)^{0.8} (5.4453)^{(1/3)} = 0.027 * 848.876 * 1.7593$$

$$Nu = 40.32$$

$$h_e = Nu k / d_{eq}$$

$$h_e = 40.32 (0.988 \times 10^{-4} \text{ Btu}/\text{ft } ^\circ\text{F s}) / (0.06249 \text{ ft})$$

$$h_e = 0.06375 \text{ Btu}/\text{ft}^2 \text{ } ^\circ\text{F s}$$

$$Q = U_c \cdot A \cdot MLTD$$

$$U_c = 1 / [(1/h_i) + (1/h_e) + R]$$

Siendo R = Resistencia del tubo

$$\text{Si } K_{\text{tubo}} = 0.0063888 \text{ Btu}/\text{ft } ^\circ\text{F}$$

Entonces:

$$R = [2.3 \log (D_o / D_i)] / 2\pi K_{\text{tubo}}$$

$$R = [2.3 \log (0.0208333 \text{ ft} / 0.0126669 \text{ ft})] / 2\pi (0.0063888 \text{ Btu}/\text{ft } ^\circ\text{F})$$

$$R = 12.38 \text{ ft}^2 \text{ } ^\circ\text{F s}/\text{Btu}$$

$$U_c = 1 / [(1/0.02572 \text{ Btu}/\text{ft}^2 \text{ } ^\circ\text{F s}) + (1/0.06375 \text{ Btu}/\text{ft}^2 \text{ } ^\circ\text{F s}) + 12.38 \text{ ft}^2 \text{ } ^\circ\text{F s}/\text{Btu}]$$

$$U_c = 0.0149 \text{ Btu}/\text{s ft}^2 \text{ } ^\circ\text{F}$$

$$MLTD = (\Delta t_2 - \Delta t_1) / [\ln (\Delta t_2 - \Delta t_1)]$$

$$MLTD = (18 - 441) / [\ln (18 - 441)]$$

$$MLTD = 132.2 \text{ } ^\circ\text{F}$$

$$A_{\text{transferencia}} = Q / U_c MLTD$$

$$A = (2.18 \text{ Btu}/\text{s}) / [(0.0149 \text{ Btu}/\text{s ft}^2 \text{ } ^\circ\text{F})(132.2 \text{ } ^\circ\text{F})]$$

$$A = 1.106 \text{ ft}^2$$

Pero:

$$A = \pi d_e L$$

$$L = A / \pi d_e$$

$$L = (1.106 \text{ ft}^2) / \pi (0.0208333 \text{ ft})$$

$$L = 16.89 \text{ ft} = 515.06 \text{ cm}$$

Por lo tanto una longitud total de 5 m satisface las necesidades para EM-3.

3.5.2. – Dimensionamiento de EM-1, EM-2 y EM-4.

Utilizando las mismas ecuaciones del calculo de EM-3, se tiene lo siguiente:

Datos:

Flujo másico (M) agua caliente:

$$(M)_{\text{liquido caliente}} = 60 \text{ g/min.} = 0.124 \text{ lb/min.}$$

Calor a remover:

$$Q = 0.124 \text{ lb/min. (1 Btu/lb } ^\circ\text{F) (405 } ^\circ\text{F)}$$

$$Q = 50.22 \text{ Btu/min.} = 0.837 \text{ Btu/s}$$

Flujo másico (m) agua fría:

$$m = 50.22 \text{ Btu/min. [(1 Btu/lb } ^\circ\text{F) (18 } ^\circ\text{F)]}$$

$$m = 2.79 \text{ lb/min.} = 1265.544 \text{ g/min.}$$

$$\text{Flujo volumétrico } v = 1.265 \text{ litros/min.}$$

Coefficientes de película lado agua caliente

Volumen específico de agua caliente a 870 Psig y 527 °F

$$v = 0.0211 \text{ ft}^3/\text{lb}$$

Flujo volumétrico agua caliente

$$V = 0.124 \text{ lb/min. (0.0211 ft}^3/\text{lb) = 0.0026164 ft}^3/\text{min}$$

$$V = 4.3606 \times 10^{-5} \text{ ft}^3/\text{s}$$

$$\mu = 5.38 \times 10^{-4} \text{ lb/ft}$$

$$\rho = 47.39 \text{ lb/ft}^3$$

$$Q = 0.837 \text{ Btu/s}$$

$$C_p = 0.975 \text{ Btu/lb } ^\circ\text{F}$$

$$K_{\text{liq caliente}} = 0.988 \times 10^{-4} \text{ Btu/s ft } ^\circ\text{F}$$

$$Re = 386.1$$

$$Pr = 5.31$$

$$Nu = 0.027 \cdot 117.316 \cdot 1.7446 = 5.526$$

$$hi = 0.0431 \text{ Btu/ft}^2 \text{ } ^\circ\text{F s}$$

CAPITULO III

Coefficiente de película lado agua fría.

Flujo volumétrico (v)

$$v = 1265.5. \text{ cm}^3/\text{min.} [1 \text{ ft}^3 / (30.48 \text{ cm})^3] (1 \text{ min}/60 \text{ s})$$

$$v = 7.448 \times 10^{-4} \text{ ft}^3/\text{s}$$

$d_e = 0.0208333 \text{ ft}$ tubería equivalente externa de $\frac{1}{2}$ " , diámetro nominal

$$k = 0.988 \times 10^{-4} \text{ Btu}/\text{ft } ^\circ\text{F s}$$

$$\rho = 62.37 \text{ lb}/\text{ft}^3$$

$$d_{eq} = (d_2^2 - d_e^2)/d_e = (0.041666^2 - 0.0208333^2)/0.0208333$$

$$d_{eq} = 0.06249 \text{ ft.}$$

$$\mu = 5.38 \times 10^{-4} \text{ lb}/\text{ft s}$$

$$C_p = 1 \text{ Btu}/\text{ft } ^\circ\text{F}$$

$$Re = 1761.8$$

$$Pr = 5.445$$

$$Nu = 0.027 * 395.15 * 1.759 = 18.77$$

$$h_e = 0.0297 \text{ Btu}/\text{ft}^2 \text{ } ^\circ\text{F s}$$

$$R = 12.38 \text{ ft}^2 \text{ } ^\circ\text{F s}/\text{Btu}$$

$$U_c = 0.0144 \text{ Btu}/\text{s ft}^2 \text{ } ^\circ\text{F}$$

$$MLTD = 132.20 \text{ } ^\circ\text{F}$$

$$A = 0.4396 \text{ ft}^2$$

$$L = 6.71 \text{ ft} = 204.76 \text{ cm}$$

Por lo tanto una longitud total de 2 m se satisface las necesidades para EM-1, EM-2 y EM-4.

3.6.- ESPECIFICACION DE BOMBAS.

En el diseño de un sistema de bombeo hay muchos elementos que deben considerarse, no importa la clase o tipo de bomba que finalmente se escoja para la instalación. Estos elementos incluyen: columna, capacidad, naturaleza del líquido, tuberías, motores y economía. De manera que, en general, una discusión completa de cualesquiera de estos factores se aplica igualmente a una bomba centrífuga que a una rotatoria o que a una reciprocante.

3.6.1. - Selección del tipo de bomba.

A continuación se mencionan las características que definirán el tipo de bomba a seleccionar para el sistema propuesto.

TABLA 3.1. Características de los tipos de bombas.

Tipo	Tipo de fluido.	Tipo de descarga	Presión de descarga	Capacidad.
Centrífuga	1. Limpio y claro. 2. Sucio y abrasivo. 3. Con sólidos.	Continuo	Baja a alta. <30 Kg/cm ² .	Pequeña a la mayor obtenible.
Rotatoria.	Viscoso no abrasivo	Continuo	Media	Pequeña a media
Reciprocante	Limpio y claro.	Pulsante	Pequeña a la máxima que se produce. <1020 Kg/cm ²	Pequeña.

Con base a la tabla anterior, las bombas reciprocantes son adecuadas para grandes presiones y pequeños caudales y las bombas centrífugas para presiones reducidas y gastos elevados. Es por ello que se seleccionó una bomba reciprocante para las aplicaciones del sistema propuesto (B-1 y 2, BA-1,2 y 3 de la fig. 4.1.). Dentro de las bombas reciprocantes se tienen varios tipos que a continuación se muestran.

TABLA 3.2 Características de las bombas reciprocantes.

Tipo	Presión	Tipo de fluido.	Motor	Usos
Acción directa.	Baja a mediana	Aceites y agua.	Vapor	Alimentación de caleras, manejo de lodos.
Bombas de potencia.	Alta	Agua.	Eléctrico o combustión interna	Prensa hidráulica
Potencia de baja capacidad.	Alta	Agua, aceites y polímeros.	Eléctrico.	Dosificación a calderas. capacidad variable.
Diafragma	Mediana	Agua, aceites, polímeros, fluidos con sólidos y pulpas.	Eléctrico.	Gastos elevados

Las características necesarias para las bombas del sistema propuesto son. entonces, las siguientes.

Bomba	Presión de descarga Kg/cm².	Gasto, ml/min.	Tipo de fluido.
B-1	3	70.6	Agua.
B-2	60	70.6	Agua.
BA-1,2 y3.	3	5.0	Agua y polímeros.

DIMENSIONAMIENTO DEL EQUIPO.

Con base a lo anterior y a las características de las bombas reciprocantes se especificaron los siguientes tipos de bombas para cada aplicación.

Bomba	Tipo	Motor	Características adicionales.
B-2	Bomba de potencia.	Eléctrico.	Capacidad variable.
B-1	Potencia de baja capacidad.		
BA-1,2 y3.			

3.6.2. Cálculo de la potencia de bomba.

El funcionamiento de las bombas reciprocantes no se basa en la ecuación de Euler, sino en el principio del desplazamiento positivo. De donde se calcula la potencia de la bomba como:

$$\text{Potencia} = QH/\eta$$

Donde:

Q = gasto volumétrico de la bomba.

H = Columna estática = Hd + Hf + Hv

Hd = Presión de descarga.

Hf = Pérdidas por fricción, para fines de cálculo se consideran despreciables.

Hv = Caída de presión de las válvulas y en el interior de la bomba, para fines de cálculo se consideran despreciables.

Para B-2 se tiene:

$$Q = 120 \text{ g/min.} = 120 \text{ cm}^3/\text{min.}$$

$$H = 3000 \text{ Psi.} = 210,900 \text{ g/cm}^2$$

$$\eta = 0.8$$

$$\text{Potencia} = \frac{120 \text{ cm}^3/\text{min} (210,900 \text{ g/cm}^2)}{0.8} = 31,635.000 \text{ g}\cdot\text{cm}/\text{min.}$$

$$\text{Potencia} = 31,635,000 \text{ g}\cdot\text{cm}/\text{min.} \left(\frac{1 \text{ HP}}{4.56 \times 10^8 \text{ g}\cdot\text{cm}/\text{min.}} \right) = 0.1 \text{ HP.}$$

CAPITULO III

Para B-1 se tiene:

$$Q = 120 \text{ g/min.} = 120 \text{ cm}^3/\text{min.}$$

$$H = 1000 \text{ Psi.} = 70,300 \text{ g/cm}^2$$

$$\eta = 0.8$$

$$\text{Potencia} = \frac{120 \text{ cm}^3/\text{min} (70,300 \text{ g/cm}^2)}{0.8} = 10,545,000 \text{ g}\cdot\text{cm}/\text{min.}$$

$$\text{Potencia} = 10,545,000 \text{ g}\cdot\text{cm}/\text{min.} \left(\frac{1 \text{ HP}}{4.56 \times 10^8 \text{ g}\cdot\text{cm}/\text{min.}} \right) = 0.03 \text{ HP.}$$

Para BA-1,2 y 3 se tiene:

$$Q = 60 \text{ g/min.} = 60 \text{ cm}^3/\text{min.}$$

$$H = 1000 \text{ Psi.} = 70,300 \text{ g/cm}^2$$

$$\eta = 0.8$$

$$\text{Potencia} = \frac{60 \text{ cm}^3/\text{min} (70,300 \text{ g/cm}^2)}{0.8} = 5,725,000 \text{ g}\cdot\text{cm}/\text{min.}$$

$$\text{Potencia} = 5,725,000 \text{ g}\cdot\text{cm}/\text{min.} \left(\frac{1 \text{ HP}}{4.56 \times 10^8 \text{ g}\cdot\text{cm}/\text{min.}} \right) = 0.02 \text{ HP.}$$

En el mercado no existen bombas con tan pequeña potencia, pero se buscó que las bombas cubrieran las características anteriormente descritas y que fueran capaces de desarrollar los flujos y presiones necesarios.

Se seleccionaron las siguientes bombas:

Bomba	Marca	Modelo.	Potencia, HP.	P descarga, Kg/cm ²	Flujo máximo ml./min.
B-1	Pulsatron	LPH5	1/8	10	183
B-2	Alldos	KM 283	3/4	101	450
BA-1,2 y3	Pulsatron	LD02	1/16	6	17

Las bombas que se seleccionaron para el sistema propuesto se conocen en el mercado como bombas dosificadoras.

INSTRUMENTACION Y SISTEMA DE CONTROL

Entre todas las características mencionadas hasta ahora las calderas también deben ser capaces de:

- a) Aprovechar la energía calorífica generada eficientemente para la producción de vapor.
- b) Por razones de seguridad, deben operar dentro de los parámetros establecidos, sin grandes variaciones.
- c) Controlar su propio suministro de energía.
- d) Su sistema de control debe operar eficientemente.

Las calderas de vapor se pueden operar con una cantidad mínima de indicadores y registradores (manualmente), pero pocas unidades se pueden operar de manera segura y eficiente con una operación manual.

Si consideramos que muchos de los dispositivos y válvulas que controlan los flujos de aire, combustible y agua, requieren gran esfuerzo para una rápida manipulación, el sistema de control libera a los operadores de estas tareas y les permite dedicar tiempo a otras actividades; por supuesto, un sistema de control no elimina la necesidad de los operadores, solo hace más eficiente la operación de la caldera.

Hoy en día, la operación manual esta cayendo en desuso debido a que muchos sistemas y componentes de control hacen el trabajo más eficientemente.

Para la automatización de una caldera industrial se necesita controlar básicamente los siguientes rubros:

- (1) Flujo de combustible.
- (2) Flujo de aire para combustión.
- (3) Flujo del agua de alimentación.
- (4) Presión del vapor.
- (5) Purga.

CAPITULO IV

Los sistemas de control para las calderas modernas generalmente incluyen válvulas de relevo y seguridad, apagadores, equipo para ignición, control de combustión y asegurador de flama además de la automatización de arranque y paro.

4.1. FALLAS COMUNES EN LAS CALDERAS.

Aun con todos los dispositivos y controles automáticos que actualmente se utilizan en las calderas, siguen presentándose accidentes.

La principal razón de lo anterior es la poca o completa ausencia de estándares. Esto es, no existe un estándar de procedimiento de operación, el cual recaude la experiencia de fallas que hayan sucedido anteriormente.

Aunado a esto, muchos propietarios de calderas tienen una sola cosa en la mente cuando compran calderas provistas con controles automáticos: Esperan operar sin los beneficios de un operador calificado.

El accidente más común hoy en día en calderas industriales es el paro en el suministro de agua, lo que ocasiona sobrecalentamiento, fractura y ruptura de tubos, colapso del horno o de la pared de los tubos y en algunos casos la completa destrucción de la caldera por medio de una explosión. Aproximadamente el 75% de las fallas en calderas son causadas por estos paros en el suministro de agua.

Haciendo referencia a las calderas industriales, muchos propietarios sienten que si una caldera está completamente protegida contra accidentes, sin comprender completamente cuan peligroso puede ser un recipiente a presión calentado a fuego directo, y no consideran que los sistemas de control también tienen fallas y necesitan mantenimiento.

Algo que hay que entender muy bien es que las calderas provistas con controles y dispositivos de seguridad no garantizan que estarán libres de fallas. Un programa de mantenimiento y revisión tanto para la caldera como para el sistema de control será lo que disminuirá en gran medida la incidencia de fallas en calderas.

Por lo anterior se realizó contar con un procedimiento de operación para la caldera y que se adecúe a las necesidades específicas del sistema propuesto, para el caso de la caldera experimental se presenta un procedimiento, el cual se encuentra en el anexo A.

4.2.- SISTEMA PROVEEDOR DE CALOR.

Para las calderas industriales la automatización del sistema de combustión permite al equipo de combustión ponerse en servicio sin la supervisión exhaustiva del operador logrando así, la operación del sistema de combustión de una manera segura y eficiente.

El sistema de control sensa las condiciones de operación y hace que la caldera responda a cambios en la demanda de vapor e incluso el paro de la unidad cuando la demanda de vapor es cero. También si surge un problema que ponga en peligro la seguridad tanto del equipo como de los operadores.

El control automático del suministro de energía, es el trabajo básico del controlador de la combustión en las calderas industriales, pero en el caso del sistema propuesto, la posibilidad de una explosión de gas está descartada debido a que el medio de calentamiento NO es la combustión, sino a través de una resistencia eléctrica tipo cartucho, cuyas dimensiones y características se especificaron en su momento y por lo tanto el control de la resistencia eléctrica se basa en eliminar la posibilidad de una explosión por sobrepresión del vapor en la caldera, esto se logra con la interrupción del suministro de energía a la resistencia eléctrica en caso de que el transmisor de temperatura del agua en la caldera indique que aquella se

CAPITULO IV

incrementa, lo que evitará el sobrecalentamiento en el tubo de prueba y garantizará que se mantenga siempre sumergido en líquido, evitando así la posibilidad de una posterior ruptura de dicho tubo.

En la figura 4.1 se muestra el diagrama de tubería e instrumentación para el sistema propuesto en donde podemos destacar el sistema de control del nivel del líquido tanto para el deaerador como para la caldera y el sistema de control de presión de esta última.

4.3.- CONTROL DEL NIVEL.

La regulación del agua de alimentación que establece el nivel de una caldera depende de múltiples factores, del tipo de caldera, de la carga, del tipo de bomba y del control de la presión del agua de alimentación.

Las tres variables que intervienen en el sistema son:

- Caudal de vapor.
- Caudal de alimentación de agua.
- Nivel de agua.

Para que las condiciones de funcionamiento sean estables, el caudal másico de vapor y el de agua deben ser iguales y de forma regular, el nivel de agua debe reajustarse periódicamente para que se mantenga dentro de los límites establecidos. Manteniendo estas funciones en las tres variables, los instrumentos correspondientes pueden estar relacionados entre sí de varias formas.

En el sistema propuesto, el control del nivel de la caldera se lleva a cabo por medio de un indicador de nivel de presión diferencial debido a la sensibilidad que se requiere y a la poca variación que se desea en el nivel del líquido (± 2 cm).

Como se pudo ver en el capítulo II la resistencia eléctrica que proporciona el medio de calentamiento para la caldera experimental se encuentra en la zona de ascenso de vapor, envuelta por un tubo de prueba en donde se busca evitar (como ya se dijo antes) el sobrecalentamiento, por lo que el controlador del nivel del líquido deberá incrementar también el flujo de líquido, en caso de que se detecte una disminución en el nivel, enviando una señal al actuador de la bomba B-2.

En la figura 4.1 se puede ver también que el sistema de control de nivel se encuentra constituido por: Un vidrio de nivel (LG), un indicador de nivel (LI), un transmisor de nivel (LT) así como de alarmas e interruptores de alto y bajo nivel (LSL, LSH, LAH y LAL), cabe señalar que existe un sistema de control en el deaerador y otro en la caldera, ambos con el objeto de controlar el nivel respectivo de cada uno de los equipos.

El transmisor de nivel envía la señal al controlador e indicador de nivel y éste al actuador del motor de la bomba de alimentación a la caldera, lo que garantiza que el tubo de prueba se mantendrá sumergido y no habrá sobrecalentamiento en el tubo de prueba por ausencia de líquido y que habrá compensación del líquido por un aumento en el flujo de vapor.

En el caso del deaerador, además de asegurar el suministro de agua a la caldera, se busca proteger a la bomba B-2 evitando que cavite al quedarse sin agua. Esto se logra manteniendo el nivel constante en TM-1 de manera similar a como se logra con la caldera experimental.

4.4. ASEGURADOR DEL SUMINISTRO DE ENERGIA.

En las calderas industriales se cuenta con dispositivos tales como elementos detectores ultravioleta, relé de llama, etc. lo que le permite a este tipo de calderas realizar acciones tan sencillas como activar una alarma hasta acciones tan complejas como realizar la limpieza de los gases que pudieran acumularse en la caldera.

En el caso del sistema propuesto, el medio de calentamiento no produce ensuciamiento por combustión, ni requiere la presencia del aire para poder llevar a cabo la producción de vapor, por lo tanto, no requiere un sistema de aseguramiento del suministro de energía, la principal desventaja que presenta es, que es dependiente del sistema de distribución de energía eléctrica, por lo que cualquier falla en el suministro de energía eléctrica produciría el paro de la prueba que se estuviera llevando a cabo, por lo que se cuenta con una pequeña planta generadora que provee la energía necesaria para evitar el paro de una prueba por falla en el suministro de energía eléctrica.

4.5. CONTROL DE LA PRESIÓN.

En el diagrama de la figura 4.1. se puede apreciar también que el controlador de la presión de vapor en la caldera CE-1, envía la señal a la válvula de control proporcional (VC-1) a la salida del vapor para mantener dicha presión en un cierto rango de operación.

La válvula de control proporcional se activa por un convertidor de señal el cual envía la orden de abrir o cerrar, según la presión que marque el transmisor de presión, manteniendo este parámetro dentro de un límite establecido, (55 – 65 Kg/cm²). La válvula de seguridad de CE-1 se ajusta para que se active a un 30 % arriba de la P_{op} (P_{ac}=80 Kg/cm²).

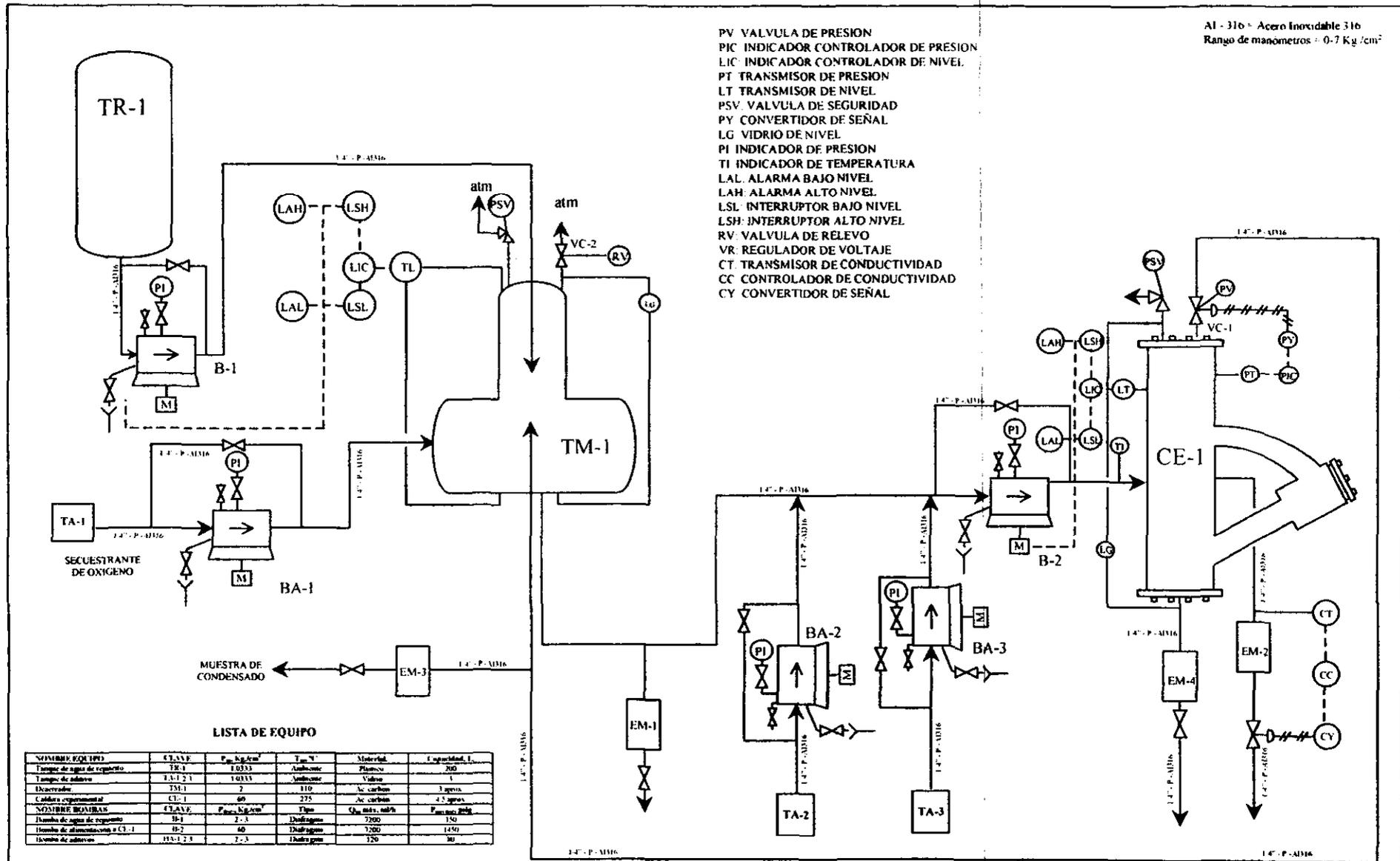
En el deaerador la presión también se controla por medio de una válvula de relevo, solo que en este equipo se mantendrá a 3 Kg/cm². La válvula de seguridad de TM-1 se ajusta a un 30% aproximadamente de la P_{op} (4 Kg/cm²).

4.6. CONTROL DE LA CONDUCTIVIDAD.

En el sistema propuesto, el agua de caldera deberá contener un nivel máximo de sales disueltas, esto es, que el control de los ciclos de concentración[†] del agua de caldera se realizará por medio de la conductividad; al determinar la conductividad se puede determinar la concentración en el seno de la caldera, por lo que se hace necesario la instalación de un transmisor de conductividad a la² salida de la purga de la caldera, la que se encargará de controlar el flujo de la purga, aumentándola o disminuyéndola, según aumente o disminuya la conductividad establecida como "set point".

Al rebasar la conductividad el límite establecido, el transmisor (CT) envía una señal a la válvula de control de la purga para que expulse líquido, lo que causará que el controlador de nivel aumente el flujo de entrada de agua, y que disminuya la conductividad.

[†] Los ciclos de concentración y la conductividad son una medida directa de la concentración de las sales disueltas. La conductividad es aproximadamente dos veces los sólidos totales disueltos. Para el cálculo de los ciclos de concentración ver la sección 2.15 del manual de operación del Anexo A.



DISEÑO:
HARRISON BERISTAIN CARLOS
MANCERA CORTÉS MARIO

REVISÓ: JESUS MARIN C.
APROBÓ: JESUS MARIN C.
CLIENTE: IMP
FECHA: 11/Ene/99



FIGURA 4.1.
DIAGRAMA DE TUBERÍA
E INSTRUMENTACIÓN
DE CALDERA
EXPERIMENTAL

Para comprobar la confiabilidad del equipo se realizaron una serie de pruebas que a continuación se mencionan.

5.1. - PRUEBAS METALOGRAFICAS.

Con el objeto de corroborar la calidad del material con que se construyó el equipo CE-1, se le realizaron pruebas para determinar la composición de los componentes, así como su textura y la calidad de la soldadura.

Las pruebas metalográficas realizadas al equipo CE-1 se llevaron a cabo conforme a los requerimientos especificados en los métodos ASTM-E-350 y ASTM-E-384.

Para un depósito de soldadura se aplicaron las siguientes pruebas:

5.1.1. - Análisis químico cuantitativo.

En el capítulo III se hizo la selección del material que se usó en la fabricación del equipo CE-1, así como su especificación en cuanto al análisis químico cuantitativo de sus componentes. A continuación se muestran los resultados obtenidos para el análisis químico cuantitativo en % peso, obtenidos del equipo CE-1.

IDENTIFICACION DE LA MUESTRA	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo
METAL BASE	0.44	0.79	0.21	0.014	0.027	0.78	0.079	0.18
SOLDADURA	0.12	0.52	0.17	0.013	0.022	1.36	0.05	0.49

Estas composiciones se encuentran dentro de especificación según se estableció en la sección 3.3.1..

CAPITULO V

5.1.2. - Microdureza.

Para las pruebas de microdureza se obtuvieron los siguientes resultados.

ZONA	DUREZA (HRC*).
SOLDADURA	25
METAL BASE	27
ZONA AFECTADA POR EL CALOR	30

La dureza máxima recomendada para la zona afectada por el calor para equipos de proceso es 35 HRC. De los resultados encontrados en las muestras demuestran que la aplicación de la soldadura no afectó significativamente la microdureza de los materiales.

5.1.3. - Observación metalográfica.

Debido a las condiciones de operación que se manejan en el equipo CE-1 es necesario tener mayor cuidado en la calidad de la aplicación de la soldadura, para tales condiciones una mala soldadura pudiera aumentar la fragilidad de la junta y disminuir el tiempo de vida útil del equipo u ocasionar un accidente más serio, que puede evitarse simplemente comprobando que la soldadura fue correctamente aplicada.

Para los resultados siguientes haga referencia a las figuras 5.1, 5.2 y 5.3.

ZONA	CARACTERISTICAS
SOLDADURA	Base ferrítica.
METAL BASE	Martensita revenida.
ZONA AFECTADA POR EL CALOR	Perlita ferrítica.

* Hardness Rockwell - C.= Dureza Rockwell - C

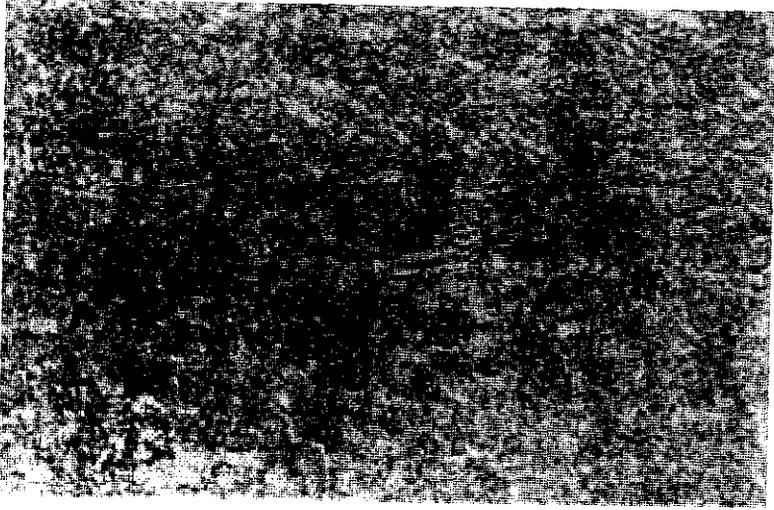


Figura 5.1. Microestructura de la soldadura mostrando una base ferrítica homogénea sin defectos.

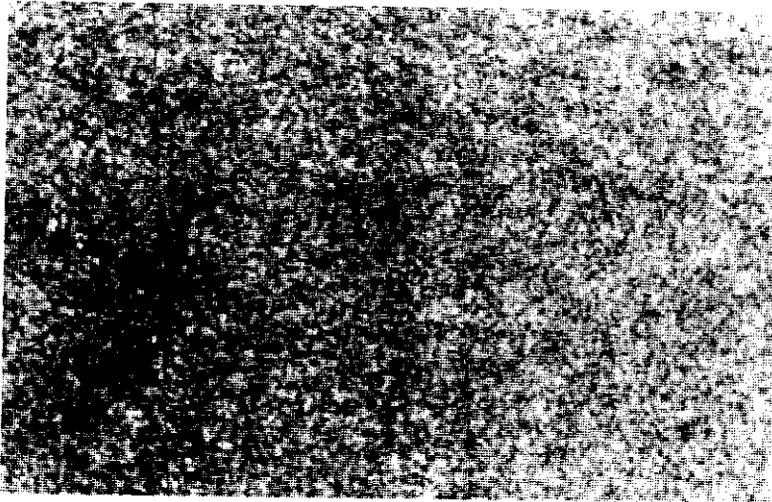


Figura 5.2. Microestructura del metal base mostrando una base consistente en martensita revenida sin defectos.

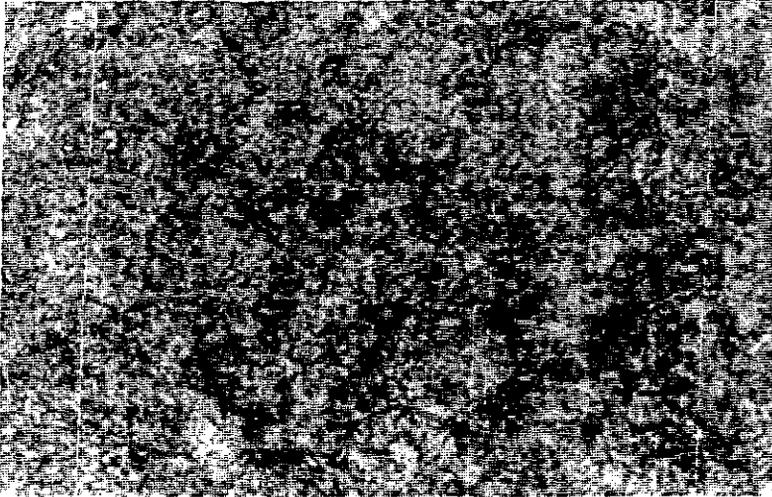


Figura 5.3. Microestructura de la zona afectada por el calor mostrando una base consistente en perlita-ferrítica homogénea sin defectos.

Se observa que las muestras metálicas son homogéneas y sin defectos, además de que las microestructuras corresponden a las microdurezas encontradas, lo cual demuestra que la soldadura fue correctamente aplicada y por lo tanto adecuada para las condiciones de operación que se manejan, cualquier defecto en la soldadura necesariamente habría hecho rechazar al equipo como equipo de evaluación.

Dados los resultados de las pruebas metalográficas se considera que el equipo se construyó conforme a las especificaciones dadas en el capítulo III, aunque estas pruebas no son suficientes para pensar que el equipo está listo para usarse en evaluaciones de aditivos, todavía debe aprobar más pruebas.

5.2. - PRUEBA NEUMATICA.

El equipo de trabajo CE-1 contendrá en operación normal 2 fases a alta presión, por lo que el equipo tiene que operar con ausencia de fugas a la presión de operación especificada de manera segura y confiable.

Al equipo CE-1 se le realizó una prueba neumática estándar a temperatura ambiente conforme al método ASME para recipientes a presión, sección VIII (Referencia 2).

La presión para la prueba neumática deberá exceder el 25% de la presión máxima de operación, la presión de operación normal es 60 Kg/cm², como margen de seguridad se fija un 15% adicional dando como Presión máxima de operación 70 Kg/cm², por lo tanto.

$$P_{\text{prueba neumática teórica}} = (70 \text{ Kg/cm}^2) (1.25) = 90 \text{ Kg./cm}^2$$

La presión de la prueba neumática debe ser superior a 90 Kg/cm², por lo tanto se especificó 120 Kg/cm² como presión de prueba neumática real, en esta prueba se utilizó aire. Con todas las salidas selladas y con todo el equipo de presurización listo para la prueba, se realizó la primera inspección antes de empezar la prueba.

Toda inspección que se realizó en el recipiente consistió en examinar con cuidado la presencia de alguna fuga de aire, lo que se puede detectar con facilidad si se presenta alguna disminución de presión en el manómetro indicador conectado a la caldera después de cerrar la válvula de alimentación, además de revisar que no se presente ninguna deformación del equipo.

Se inició la prueba con incrementos de presión de 5 Kg./cm² por minuto, hasta llegar a 60 Kg /cm², con su respectiva inspección en cada intervalo.

Posteriormente se realizaron incrementos de presión de 10 Kg./cm² hasta llegar a la presión máxima de la prueba (para este caso 120 Kg./cm²) con su respectiva inspección en cada intervalo.

Se mantuvo esta presión (120 Kg./cm²) durante un periodo de 10 minutos. Al final del periodo se realizó una nueva inspección.

Por último se disminuyó la presión un 20 % y se mantuvo esta presión (96 Kg./cm²) durante 30 minutos, entonces se realizó otra inspección. Posteriormente se eliminó la presurización del equipo y se realizó la última inspección.

Todas las inspecciones realizadas al equipo antes, durante y después de la prueba fueron satisfactorias, por lo tanto se consideró que aprobó la prueba.

5.3. - PRUEBA HIDROSTATICA.

Al equipo CE-1 también se le realizó una prueba hidrostática estándar a temperatura ambiente conforme al método ASME para recipientes a presión, sección VIII (Referencia 2).

La presión para la prueba hidrostática será al menos 50% arriba de la presión máxima de operación, por lo tanto.

$$P_{\text{prueba hidrostática}} = (70 \text{ Kg./cm}^2) (1.5) = 105 \text{ Kg./cm}^2$$

La presión de la prueba hidrostática debe ser superior a 105 Kg/cm², por lo tanto se especificó 140 Kg/cm² como presión de prueba hidrostática real, en esta prueba se utilizó aire aceite hidráulico, se llenó el recipiente con el aceite y todas sus salidas se sellaron de modo que se eliminarán las posibles bolsas de aire que se pudieran formar durante el llenado.

Con todas las conexiones selladas y con todo el equipo de presurización listo para la prueba, se realizó la primera inspección antes de empezar la prueba.

Toda inspección que se realizó en el recipiente consistió en examinar con cuidado la presencia de alguna fuga de aceite en alguna junta (esto es fácil de determinar por el color característico del aceite), tapones provisionales, soldaduras o por alguna otra parte del equipo, además de revisar que no se presente ninguna deformación del equipo.

Se inició la prueba con incrementos de presión de 5 Kg./cm² por minuto, hasta llegar a 60 Kg./cm², con su respectiva inspección en cada intervalo.

Posteriormente se realizaron incrementos de presión de 10 Kg./cm² hasta llegar a la presión máxima de la prueba (para este caso 140 Kg./cm²) con su respectiva inspección en cada intervalo.

Se mantuvo esta presión (140 Kg./cm²) durante un periodo de 48 hrs. Al final del periodo se realizó una nueva inspección.

Al final de la prueba, se eliminó la presurización del equipo y se realizó la última inspección.

Todas las inspecciones realizadas al equipo antes, durante y después de la prueba fueron satisfactorias, por lo tanto se consideró que aprobó la prueba.

5.4. - PRUEBAS DEL SISTEMA DE CALENTAMIENTO.

Antes de comenzar con las primeras pruebas de evaluación se estableció el comportamiento del sistema de calentamiento ya integrado a la caldera en una primera prueba de funcionalidad.

CAPITULO V

Para realizar esta prueba es necesario montar y conectar el equipo e instrumentos como se especificó en los capítulos II, III y IV (figura 4.1), eliminar fugas y preparar el material necesario para la prueba (como referencia revise el Anexo A).

Previo al montaje del equipo es conveniente realizar una limpieza a la caldera experimental, debido a los residuos de materia orgánica (aceite) que pudieran quedar después de la prueba hidrostática, como una referencia se incluyó en el Anexo B un procedimiento para realizar la limpieza química a calderas.

Para llevar a cabo la prueba se siguieron los siguientes pasos: se llenó el equipo CE-1 con agua hasta 1 cm debajo del nivel de operación normal, se cerraron la válvula de purga continua, la válvula de lodos y la válvula de alimentación.

Se inició el calentamiento y se determinó la presión y la temperatura a intervalos de 30 minutos durante la prueba. Cinco minutos después de que comenzó la salida del vapor se cerró VC-1 para elevar la presión y permitir evacuar el aire. Cuando se llegó a 62 Kg./cm^2 , se empezó a sacar poco a poco el vapor de modo que no disminuyera la presión debajo de los 60 Kg/cm^2 (Este vapor se condensa totalmente en EM-3), después de que el nivel descendió 2 cm debajo del nivel de operación normal, se comenzó la alimentación del agua al equipo CE-1, de modo que el nivel del líquido se mantenga constante e igual al de operación normal. Para detalles más precisos del procedimiento de arranque ver el Anexo A. En esta primera prueba se determinó flujo de condensado, flujo de alimentación, presión y temperatura de operación.

PRUEBAS DE OPERACION

De la prueba anterior se obtuvieron los siguientes resultados:

Temperatura de Vapor alcanzada = 274.4°C

Presión de operación de CE-1 = 60 Kg/cm^2

Presión de descarga de la bomba = 60 Kg/cm^2

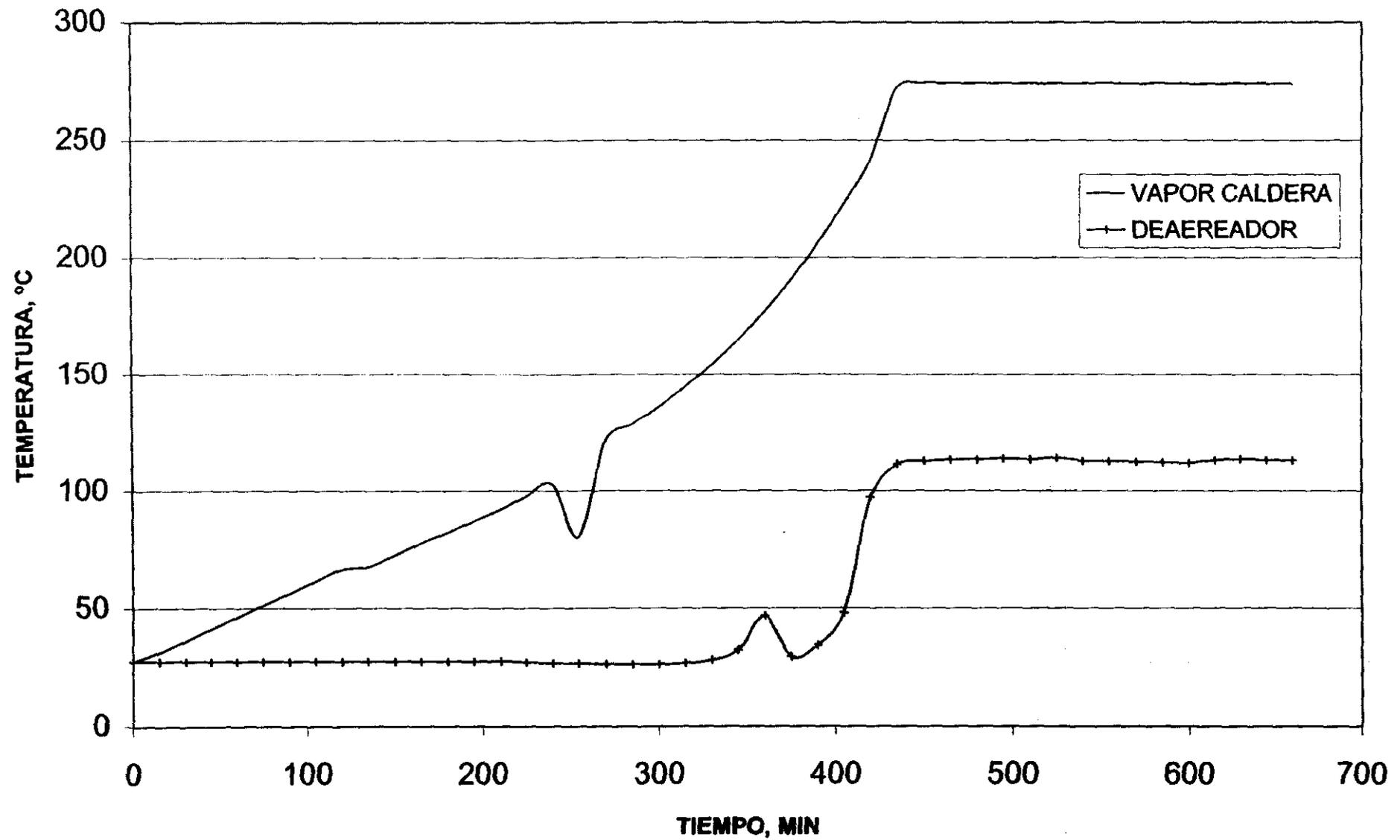
Flujo de vapor (como condensado) = 60 g/min .

Flujo de alimentación = 60 g/min .

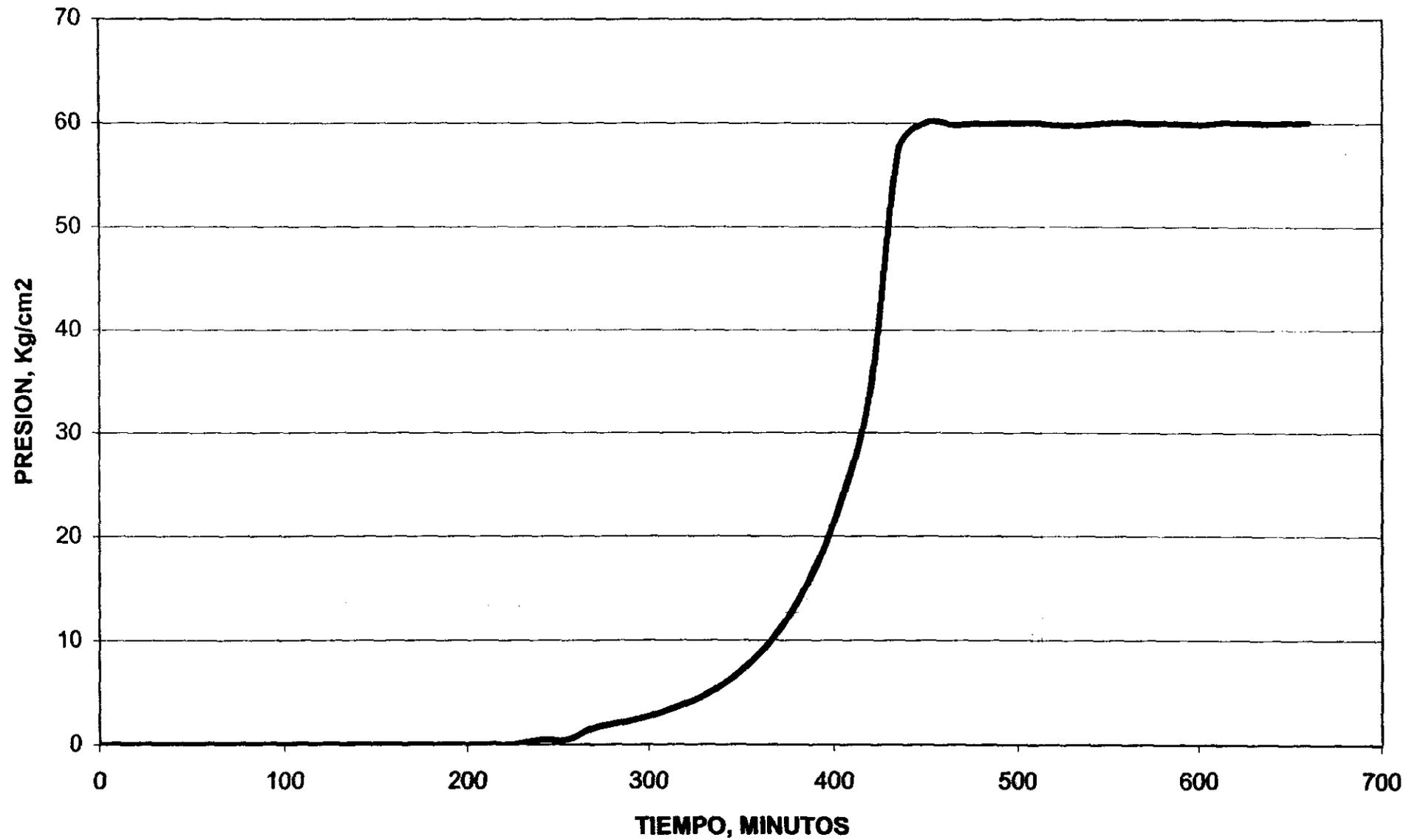
Tiempo en que se alcanzaron las condiciones de operación = 7 hrs.

Durante la prueba de funcionalidad se obtuvieron los datos de presión y temperatura de la caldera y de temperatura del TM-1, estos datos se presentan en las gráficas 5.1 a la 5.3.

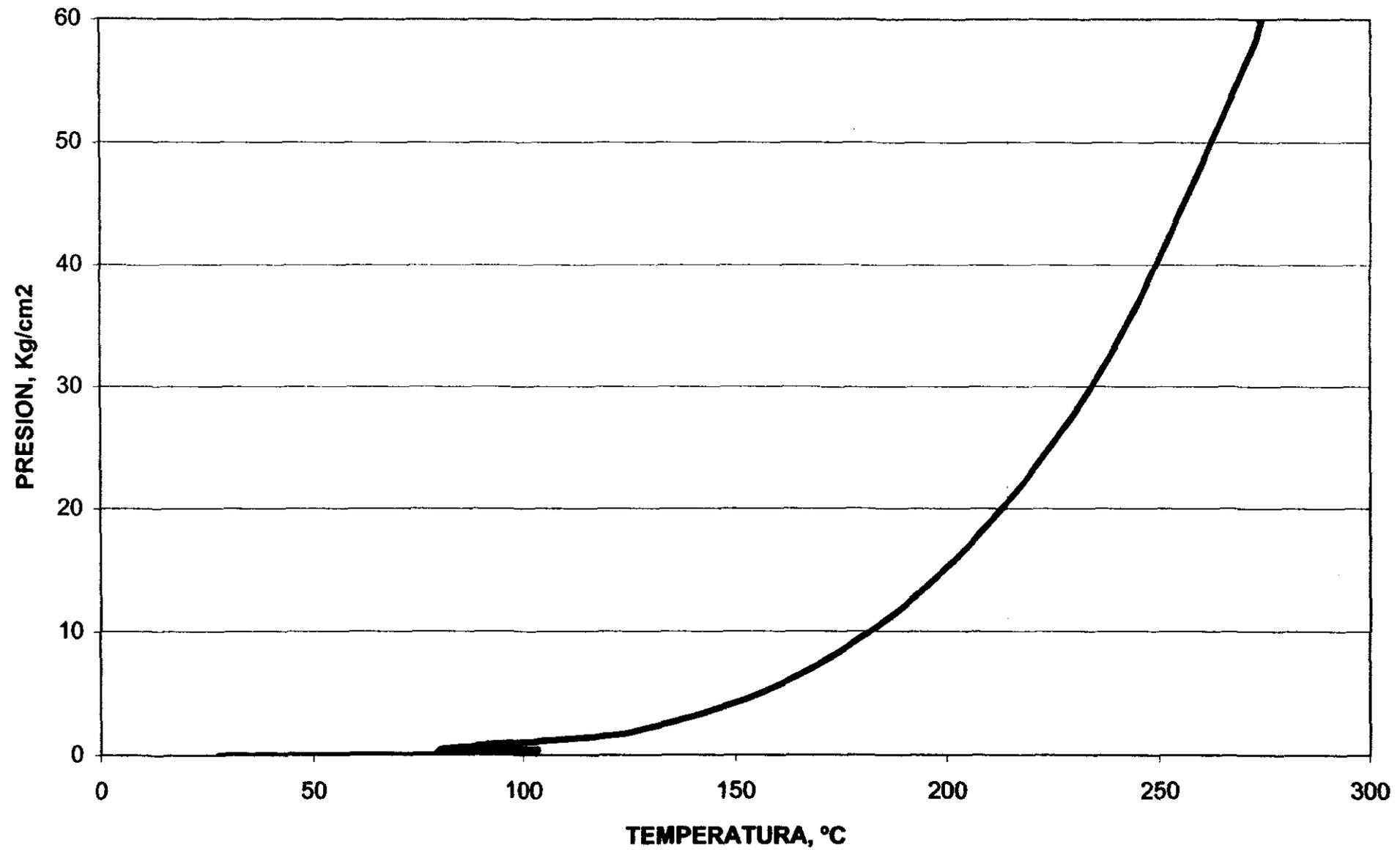
GRAFICA 5.1.
PRUEBA DE FUNCIONALIDAD CALDERA EXPERIMENTAL
TEMPERATURA vs TIEMPO



GRAFICA 5.2
PRUEBA DE FUNCIONALIDAD DE CALDERA EXPERIMENTAL
PRESION EN CE-1 vs TIEMPO



GRAFICA 5.3
PRUEBA DE FUNCIONALIDAD CALDERA EXPERIMENTAL
PRESION vs TEMPERATURA EN CE-1



De acuerdo a las pruebas y resultados expuestos en el presente trabajo se puede concluir que se cuenta con:

- Un sistema experimental de generación de vapor que es capaz de reproducir las condiciones de operación, de presión y temperatura, semejantes a las de las caldera industriales que se utilizan en PEMEX.
- Una caldera que está constituida con los mismos materiales que los equipos industriales que se utilizan en PEMEX.
- Una caldera experimental en la cual se pueden realizar evaluaciones a los diferentes tipos de aditivos utilizados para la protección de equipos de generación de vapor industriales.
- Un equipo que nos permite hacer una mejor selección de aditivos, a fin de ofrecer al cliente el mejor tratamiento interno en cuanto al control de corrosión e incrustación.
- Un equipo que nos permite evaluar nuevos aditivos cuyo desempeño no se conoce.
- Un equipo seguro y confiable para la evaluación de aditivos.
- Un equipo en el cual se pueden realizar pruebas de evaluación en un corto tiempo.

Por lo anterior se concluye que los objetivos planteados durante el presente trabajo se han cubierto satisfactoriamente.

PROCEDIMIENTO DE OPERACIÓN.

1. - Prueba de hermeticidad y calibración.

- 1.1. Revisar el estado físico de los indicadores y transmisores de presión, reguladores y bombas. En caso de observarse algún instrumento o equipo dañado o descalibrado deberá ser cambiado o calibrado antes de iniciar la prueba de hermeticidad.
- 1.2. Realizar un barrido de la planta piloto con nitrógeno durante 5 minutos purgando los equipos y líneas en diferentes puntos, como son: Purga de CE-1, puntos de muestreo, venteo de TM-1, etc., de tal manera que se desplace el aire contenido en las líneas y equipos.
- 1.3. Presionar la sección de generación de vapor a 65 Kg./cm² con nitrógeno y en caso de existir fugas corregirlas.
- 1.4. Presionar la sección de mezclado y deaeración a 4 Kg./cm² con nitrógeno y en caso de existir fugas corregirlas.
- 1.5. Con planta hermética a 65 y 4 Kg./cm² en las secciones antes descritas, depresionar la caldera dejando la válvula de venteo abierta a la atmósfera, y en el Tanque Deaerador cerrar la válvula de venteo.
- 1.6. Llenar con agua el Tanque Mezclador-Deaerador hasta el nivel establecido a las condiciones de operación mediante la Bomba de Agua de Reposición (B-1).
- 1.7. Con la presión generada durante el llenado del Tanque Deaerador enviar el agua hacia la Caldera e iniciar el llenado de la misma hasta el nivel establecido a las condiciones de operación mediante la diferencial de presión existente entre ambos equipos.

ANEXOS

- 1.8. Probar el calentamiento de la resistencia en el brazo de la caldera. Cuando se detecte un incremento de presión y de temperatura en el domo de la caldera suspender el calentamiento.
- 1.9. Llenar con agua los recipientes de aditivos.
- 1.10. Calibrar las válvulas de relevo de presión de las bombas de inyección de aditivos a 2 Kg./cm^2 .
- 1.11. Iniciar la operación de las bombas de inyección de aditivos bloqueando las válvulas de alimentación al proceso, alcanzar la presión de relevo en las válvulas de seguridad e iniciar la calibración de las bombas.
- 1.12. Elaborar las curvas de calibración de las bombas de aditivos.
- 1.13. Drenar los recipientes de aditivos.
- 1.14. Depresionar la planta, y cerrar las válvulas de venteo de los equipos.

2. - Arranque y prueba de funcionalidad.

- 2.1. Probar el calentamiento de la resistencia en el brazo de la caldera. Cuando se detecte un incremento de presión y de temperatura en el domo de la caldera suspender el calentamiento.
- 2.2. Llenar los recipientes de aditivos con el aditivo correspondiente y de acuerdo al flujo establecido en el programa de experimentos, ajustar la carrera de la bomba para la inyección de cada uno de ellos.
- 2.3. Iniciar el calentamiento del agua en la caldera mediante la resistencia eléctrica, manteniendo la válvula de control de presión de la caldera alineada en posición "manual" con salida de "cero".

- 2.4. Programar los sistemas de control a las condiciones requeridas, y fijar los puntos de alarma para las variables de control del proceso en la Unidad del sistema de monitoreo y control.
- 2.5. Por la acción del calentamiento del agua y la generación del vapor en la caldera, el nivel del agua, la presión y la temperatura en el vapor tenderá a subir.
- 2.6. Al alcanzar la presión aproximada de 55 Kg./cm² cambiar la posición del sistema de control de presión de "manual" a "automático", y fijar el nivel alcanzado por el agua en el indicador de nivel como punto de referencia para el control de nivel.
- 2.7. Al alcanzar la presión de 60 Kg./cm² (temperatura aproximada de 275 °C) el sistema de control de presión (VC-1) actuará automáticamente disminuyendo el volumen de vapor en la caldera manteniendo una presión y una temperatura constante en la misma.
- 2.8. Ajustar el flujo de agua a la caldera mediante la bomba de agua (B-1) a la caldera para que el nivel de agua en la misma se mantenga contante (Nivel previamente establecido).
- 2.9. Ajustar el flujo del agua al tanque mezclador mediante la bomba de agua de reposición (B-2) para que el nivel de agua en el mismo se mantenga constante.
- 2.10. Por la acción del vapor que llega al tanque deaerador, la presión y a temperatura tenderán a subir por lo que el regulador de contra presión (VC-2) del mismo actuará para mantener una presión y una temperatura constante.
- 2.11. Iniciar el suministro de aditivos, realizar los ajustes necesarios en las bombas de dosificación (BA-1/2/3) y de proceso (B-1/2) para que los niveles en el tanque deaerador y en la caldera permanezcan constantes.

- 2.12. Ajustar el flujo de aditivos al proceso mediante el accionamiento de las bombas de aditivos de acuerdo a la curva de calibración respectiva.
- 2.13. Mantener y estabilizar las condiciones de operación descritas en el programa de experimentos con flujos y niveles constantes e iniciar el monitoreo de los ciclos de concentración.
- 2.14. Ajustar el flujo de purga continua al establecido en el programa de experimentos, hasta que se lleguen a los ciclos de concentración requeridos.
- 2.15. Los ciclos de concentración se calcularán en base a la conductividad del agua de la caldera con respecto a la del agua de alimentación (repuesto) para lo cual se tomará una muestra cada 2 horas en la válvula de purga continua previendo el enfriamiento de la muestra por el flujo de agua fría a través del serpentín.
El cálculo es:

$$\text{Ciclos de concentración} = \frac{\text{Conductividad de purga}}{\text{Conductividad de repuesto}}$$

- 2.16. Mantener los ciclos de concentración constantes en el agua de Caldera regulando el flujo de la purga continua y revisando el valor de la conductividad cada 2 horas como mínimo. Tomar muestras del agua de alimentación, del agua en la caldera, de la mezcla aditivos-agua y del condensado una vez por turno, teniendo cuidado siempre de enfriar previamente la muestra mediante los serpentines de enfriamiento.
- 2.17. Mantener las condiciones de operación: Ciclos de concentración, presión y temperatura por el periodo de tiempo que marque el programa de experimentos.

3. - Paro normal.

- 3.1 Al término de la experimentación, suspender el calentamiento, desactivar la resistencia de la zona de calentamiento de la caldera manteniendo los flujos de agua de reposición y mezcla constantes, El nivel de agua en la cadera se mantendrá manualmente abriendo la válvula de purga continua de la misma
- 3.2 Suspender los flujos de aditivos al proceso desactivando los motores de las bombas correspondientes y cerrando las respectivas válvulas de paso.
- 3.3 Al tener en el sistema una presión inferior a los 50 Kg./cm², suspender el flujo de agua hacia la caldera, cerrar la salida de la purga continua, abrir el venteo en el recipiente mezclador y dejar enfriar el sistema.
- 3.4 Descender la temperatura de la caldera hasta 50 – 60 °C.
- 3.5 Depresionar el sistema y drenar los lodos en un recipiente rotulándolo debidamente con fecha, No. de corrida, No. de prueba, Tipo de agua de prueba, tiempo de prueba, turno y nombre del operador.
- 3.6 Desarmar la parte del testigo de prueba para su reemplazo y efectuar la limpieza del equipo de acuerdo al procedimiento establecido en el Anexo B.

4. - Paro de emergencia.

El paro de emergencia sólo se realizará por falla de aire de instrumentos o por falla de energía eléctrica.

4.1. Por falla de aire de instrumentos.

- 4.1.1. La válvula de control de presión de la caldera cerrará y la caldera por efecto de calentamiento del agua se presionará
- 4.1.2. Para evitar un disparo de presión en la caldera, mantener la presión mediante el accionamiento manual de la válvula de by-pass de la válvula de control de presión, evitando sobrepresionar el Tanque Deaerador (TM-1).
- 4.1.3. Suspender el calentamiento manteniendo la alimentación de agua a la caldera. El nivel de agua en la caldera se controlará abriendo la purga del fondo de la misma.
- 4.1.4. Si al reestablecerse el servicio se decide continuar con la operación, ajustar los ciclos de concentración requeridos de acuerdo al punto 2.13. y subsecuentes de este manual de operación y continuar con la prueba.
- 4.1.5. Si al reestablecerse el servicio se decide no continuar con la operación, proceder con el paro de la planta como se explica a partir del punto 3.2. de este manual de operación.

4.2. Por falla de energía eléctrica.

- 4.2.1. Las bombas se desactivarán y el calentamiento se suspenderá.
- 4.2.2. Cerrar la válvula de bloqueo de la válvula de control de presión de la caldera.
- 4.2.3. Para evitar un disparo de presión de la caldera, mantener la presión mediante el accionamiento manual de la válvula de by-pass de la válvula de control de presión de la caldera.
- 4.2.4. Si al reestablecerse el servicio se decide continuar con la operación.
 - 4.2.4.1. Abrir válvula del "by pass" de la válvula de control de presión de la caldera.
 - 4.2.4.2. Iniciar calentamiento del agua en la caldera.
 - 4.2.4.3. Poner en operación las bombas de alimentación de agua a la caldera y de inyección de aditivos.
 - 4.2.4.4. Ajustar los ciclos de concentración requeridos de acuerdo al punto 2.13. de este manual de operación y continuar con la prueba.
- 4.2.5. Si al reestablecerse el servicio se decide no continuar con la operación, proceder con el paro de la planta como se explica a partir del punto 3.1. de este manual de operación.

PROCEDIMIENTO PARA LA LIMPIEZA QUIMICA

La limpieza química de superficies de calentamiento interno se aplica donde es difícil o imposible limpiar por otros métodos. Comparándola con la remoción de incrustaciones y depósitos de superficies internas calientes por medios mecánicos, la limpieza química tiene la ventaja de que el período de limpieza es reducido. Por lo general, una caldera se puede limpiar en menos de 36 horas, y nunca ocupa un tiempo mayor de 48 horas. Para el sistema propuesto es una buena opción para la remoción de residuos de aceite de la prueba hidrostática.

Procedimiento general para la limpieza química

Los pasos a seguir en un proceso de limpieza química completa se pueden agrupar en cuatro:

1. Las superficies expuestas al calor se lavan con una solución ácida que contiene un inhibidor de corrosión apropiado para disolver completamente ó parcialmente y desintegrar los depósitos.
2. Se usa agua fresca para sacar los depósitos adheridos a la superficie que se pueden desprender fácilmente y las sales de fierro solubles, además de desplazar algunos gases corrosivos ó explosivos que pudieron haberse formado en la caldera.
3. Se utiliza una solución de carbonato de sodio para eliminar completamente ó neutralizar los efectos de cualquier ácido remanente.
4. La unidad se lava con agua limpia como un enjuague final para remover algunos depósitos remanentes.

ANEXOS

Existen dos tipos de métodos para la limpieza química:

- a) Recirculación continua de la solución a través de las partes a ser limpiadas.
- b) Llenando la unidad con solución y permitiendo una absorción completa en un tiempo establecido sin recirculación.

a) Recirculación continua.

En el método de recirculación continua, se llena la unidad con solución y se recircula hasta que se completa la limpieza, durante la limpieza se monitorea periódicamente con muestras del retorno de la solución, la limpieza se considera completa cuando el ácido fuerte alcanza el equilibrio y no se detectan cambios significativos en su concentración.

b) Sin Recirculación continua.

En la limpieza por el método sin recirculación continua, la unidad se llena con solución y el tiempo de remoción se basa en las características de los depósitos, con rangos de entre 4 a 8 horas. Para asegurar una remoción completa de depósitos, el ácido de la solución será más fuerte que el requerido en el método con recirculación. En contraste con el método de recirculación, se utiliza una solución de un ácido fuerte adecuada a las incrustaciones depositadas. Las incrustaciones depositadas se forman en la superficie de calentamiento interno de una caldera, estas incrustaciones provienen de los compuestos disueltos en el agua. Para una mayor eficiencia y economía en la remoción de depósitos, estos deberán ser analizados y se deberá seleccionar el ácido que reaccione más eficientemente con los depósitos.

Cuando las incrustaciones se encuentran constituidas principalmente por silicio o silicatos, como recomendación general (no se debe considerar esto como una regla) se utiliza ácido clorhídrico, otros silicatos reaccionan más fácilmente con ácido

sulfúrico y algunos otros con una combinación de álcalis fuertes y calor. Para la obtención de resultados más favorables se puede aplicar, antes de la limpieza con el ácido, un precalentamiento por varias horas con una solución del 5 al 10% de carbonato de sodio, esto ayuda a la transformación de depósitos de silicio a compuestos más solubles. En algunos casos, para eliminar incrustaciones de silicio extremadamente difíciles, se puede incluir en la solución ácido fluorhídrico (<0.5 %).

Inhibidores

Las reacciones del ácido (HCl) con constituyentes de los depósitos de caldera son las siguientes:



Al mismo tiempo el ácido puede atacar el metal como lo indica la siguiente ecuación:



Si no se tienen los medios para prevenir o retardar la anterior reacción el ácido atacará al Fe contenido en el material del equipo. Para este propósito se adicionan a las soluciones que se utilizan en la limpieza química compuestos de arsénico, sales de bario, almidón, quinoleína, piridina, etc., como inhibidores de corrosión para prevenir o disminuir totalmente la reacción antes mencionada. Después de la selección del ácido para la solución y del inhibidor apropiado para este ácido, es necesario determinar la temperatura del solvente y el tiempo requerido para el proceso de limpieza.

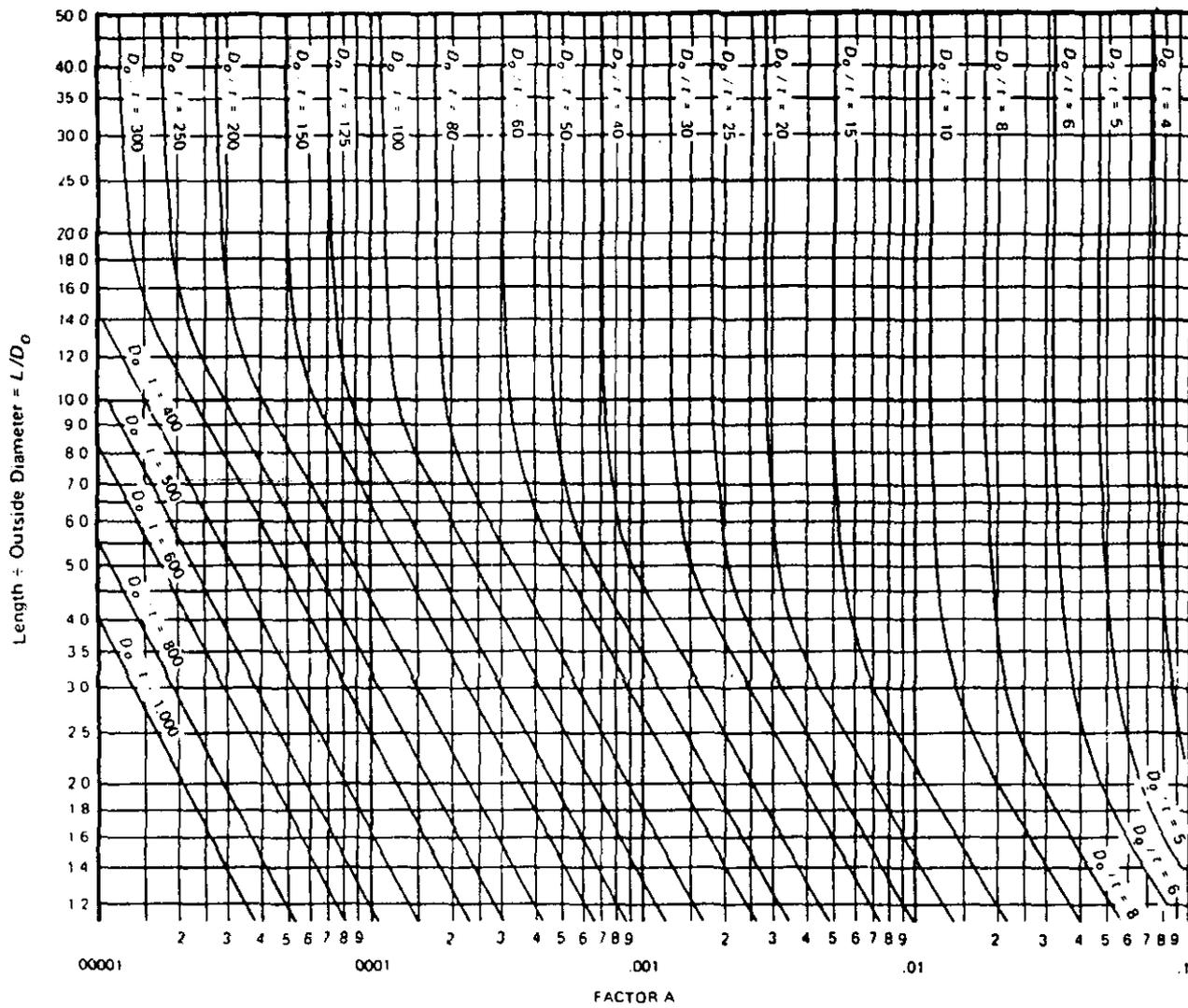
ANEXOS

Acido fuerte

Cuando la caldera es limpiada por el método de recirculación continúa se recomienda una concentración del 3% de ácido y 5% cuando la caldera es limpiada por el método sin recirculación. El ácido más comúnmente usado es el clorhídrico con una concentración de 8 a 10 partes de agua de caldera por 1 parte de ácido. Para minimizar la corrosión causada por el ácido por lo general se mezcla con un inhibidor de corrosión formador de película, el cuál ayudará a prevenir la corrosión en el metal. Como medida de seguridad la caldera **NO** se debe encender después de adicionar la solución, de modo que no exista el riesgo de descomposición del inhibidor en las superficies de transferencia de calor. A la limpieza ácida le sigue la etapa de enjuague y pasivación para asegurar que no existan residuos de ácidos.

Temperatura de la solución

Es recomendable que la temperatura **NO** rebase los 60°C, a no ser que la unidad a limpiar pueda tolerar una temperatura más alta y que los depósitos lo ameriten, además de que se utilice un inhibidor seguro a la temperatura que se efectúa la limpieza.



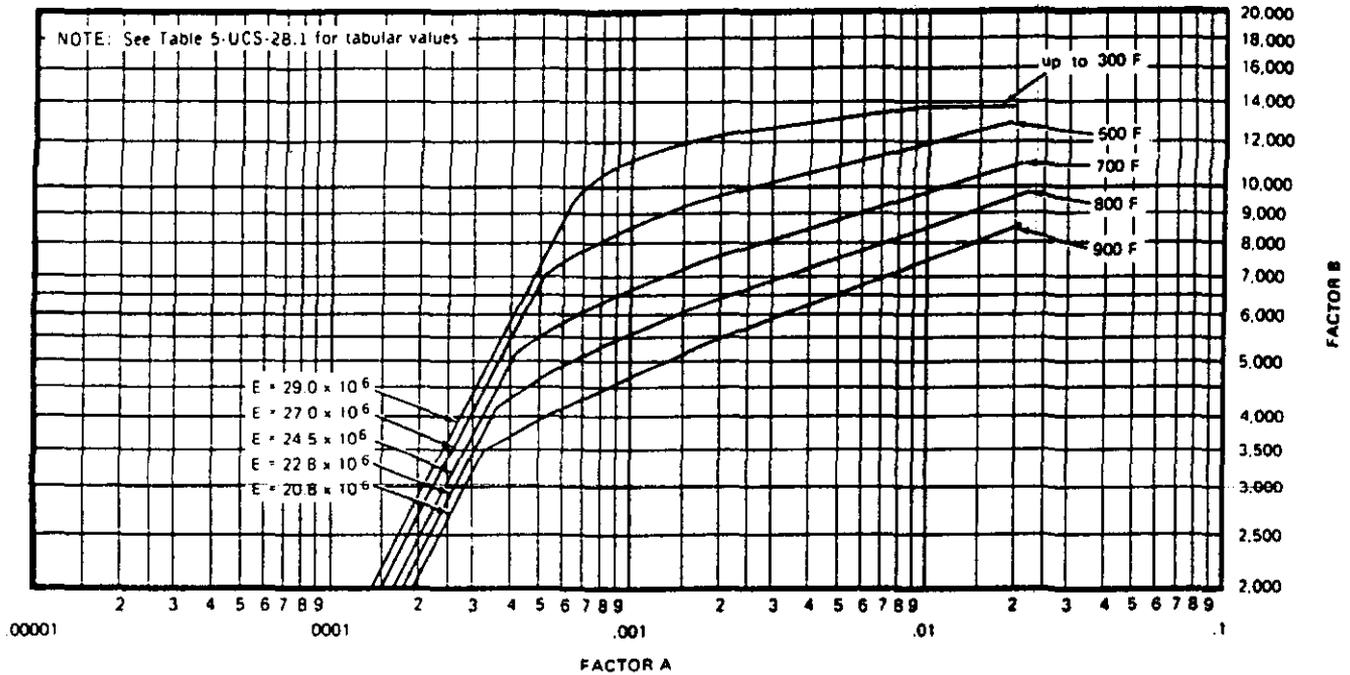


FIG. 5-UCS-28.1 CHART FOR DETERMINING SHELL THICKNESS OF CYLINDRICAL AND SPHERICAL VESSELS UNDER EXTERNAL PRESSURE WHEN CONSTRUCTED OF CARBON OR LOW ALLOY STEELS (SPECIFIED MINIMUM YIELD STRENGTH 24,000 psi TO, BUT NOT INCLUDING, 30,000 psi) [NOTE (1)]

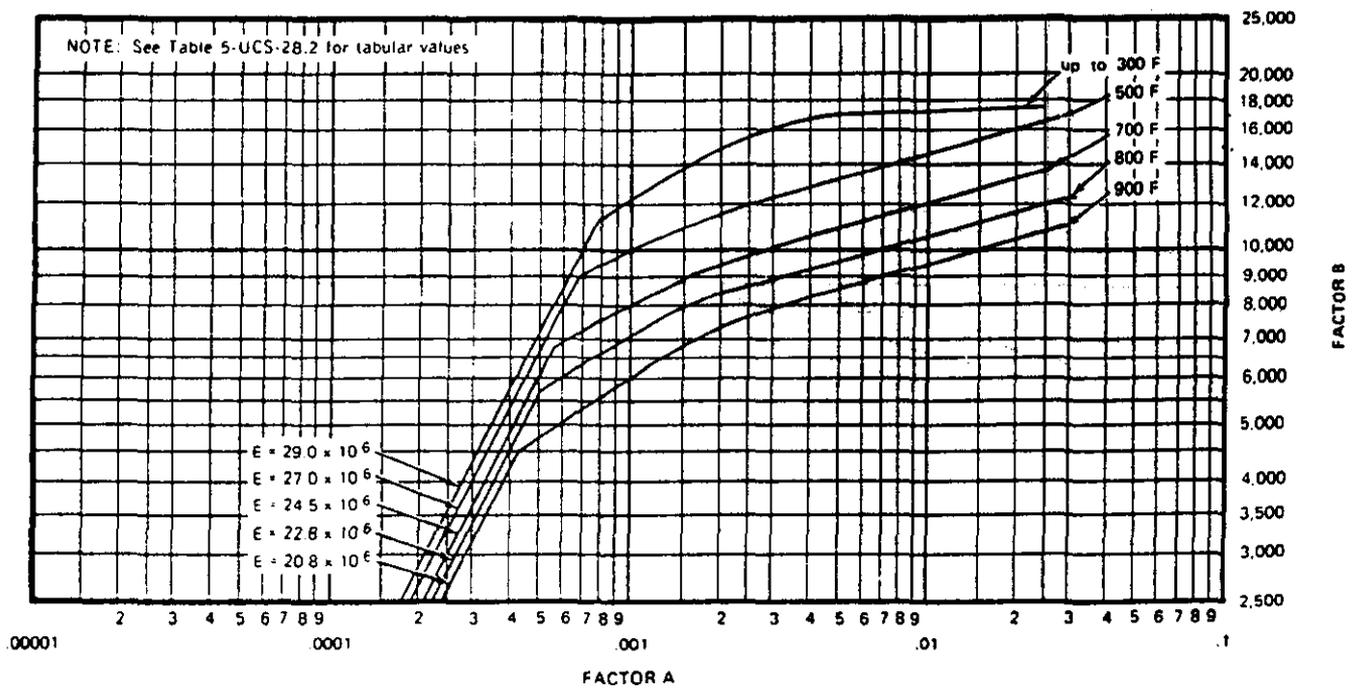


FIG. 5-UCS-28.2 CHART FOR DETERMINING SHELL THICKNESS OF CYLINDRICAL AND SPHERICAL VESSELS UNDER EXTERNAL PRESSURE WHEN CONSTRUCTED OF CARBON OR LOW ALLOY STEELS (SPECIFIED MINIMUM YIELD STRENGTH 30,000 psi AND OVER EXCEPT FOR MATERIALS WITHIN THIS RANGE WHERE OTHER SPECIFIC CHARTS ARE REFERENCED) AND TYPE 405 AND TYPE 410 STAINLESS STEELS [NOTE (2)]

DEFINICIONES DE TERMINOS.

CALDERA ACUOTUBULAR: Nombre genérico con el que se conoce también a las calderas de tubos de agua.

CALDERA DE VAPOR: Es el generador de vapor destinado para la generación de vapor de agua, exclusivamente

CALDERA PIROTUBULAR: Nombre genérico con el que se conoce también a las calderas de tubos de humo.

CALOR LATENTE: Cantidad de calor necesaria para evaporar, a temperatura constante, cierta cantidad de líquido.

CALOR SENSIBLE: Cantidad de calor necesaria para calentar un fluido a temperatura no constante, sin cambio de fase.

CICLOS DE CONCENTRACION: Número de veces que el agua ha sido concentrada, su definición matemática es:

C. C. = Conductividad de purga./ Conductividad de repuesto.

CONDUCTIVIDAD: Propiedad de un cuerpo de facilitar la propagación de la electricidad a través de su propia masa.

CORROSIÓN: Erosión debida a agentes químicos.
Ataque superficial de un metal por agentes químicos.

DEAERADOR: Equipo que utiliza vapor para disminuir la concentración de gases contenidos en el agua de repuesto a calderas.

ANEXOS

DUREZA ROCKWELL: Escala para medir la dureza de materiales llamados duros, para las escalas A, C y D se utiliza punta de diamante.

Escala A. Carga de 60 Kg/cm^2 . (20 – 61.5 DR)

Escala C. Carga de 150 Kg/cm^2 (20 – 80 DR)

Escala D. Carga de 100 Kg/cm^2 (0 – 100 DR)

GENERADOR DE VAPOR: Equipo utilizado para evaporar un fluido (mercurio u otro fluido excepto agua) y obtener su vapor saturado (o sobrecalentado).

GRADOS DE SOBRECALENTAMIENTO: Es la temperatura del vapor sobrecalentado, expresada como grados arriba de la temperatura de saturación.

INCRUSTACION: Capa de sales duras fuertemente adherida en las superficies de las calderas

PURGA: Dícese del agua extraída del interior de una caldera en operación con el objeto de mantener la concentración de sales constante.

TEMPERATURA DE EBULLICION: la temperatura de ebullición de un líquido se define como la temperatura a la cual su presión de vapor es igual a la presión total sobre su superficie libre. Esta temperatura es también conocida como la **Temperatura de saturación.**

VAPOR SATURADO: Vapor a la temperatura de saturación.

VAPOR SOBRECALENTADO: Cuando cierta cantidad de calor se le adiciona al vapor saturado, el cual está libre de contacto con líquido, y por consecuencia su temperatura se incrementa, se dice que el vapor está sobrecalentado.

LIBROS.

1. BETZ HANDBOOK OF INDUSTRIAL WATER CONDITIONING., Betz Co., , U.S.A., , 6ª Edition, 1962, 158-163
2. BOILER OPERATOR'S GUIDE, Harry M. Spring., Anthony Lawrence Kohan, Mc Graw Hill Book Co., U. S. A., , , 1981, 147-157
3. BOMBAS, su selección y aplicación., Tyler G. Hicks, Continental, México, D. F., , , 1990, 57-86
4. BOMBAS, teoría, diseño y aplicaciones., Manuel Viejo Zubicaray, Limusa, México, D. F., , 2ª Edición, 1990, 130-138
5. CALDERAS, tipos características y sus funciones, Carl D. Shield, Continental, México D. F., 6ª Impresión, 1978, 20-351 468-536 598-624
6. CENTRALES DE VAPOR, G. A. Gaffert, Reverte, Barcelona, España, , , 1981, 218-381
7. EL MARAVILLOSO MUNDO DE LA TECNOLOGIA, Daniel Mallo, Provenemex, México, D. F., 1, , 1980, 14
8. EL MARAVILLOSO MUNDO DE LA TECNOLOGIA, Daniel Mallo, Provenemex, México, D. F., Vol. 4, , 1980, 8
9. EQUIPMENT DESIGN HANDBOOK, for refineries and chemical plants, Frank L. Evans, Gulf Publishing Company, Houston, Texas, U. S. A., Vol. 2, 2ª Edición, 1974, 1 - 27
10. FENOMENOS DE TRANSPORTE, R.B.Bird, W.E. Sstewart, E.N.Lightfoot., Ediciones REPLA, México D. F., , , 1987, 9-19 a la 9-26 y 21-8 a la 21-15

BIBLIOGRAFIA

11. INSTRUMENTACION INDUSTRIAL, Antonio Creus Sole, Alfaomega-marcombo, México D. F., , 4ª Edición., 1992, 667-677
12. LOW PRESSURE BOILERS, Frederick M. Steingress., American Technical Publishing Inc., U. S. A., 1970, 13-19
13. MANUAL DE RECIPIENTES A PRESION, Diseño y cálculo; Eugene, F. Megyesy, edt. Limusa, Noriega editores; México D. F. 1997, 13-30, 33-346.
14. OPTIMAL DESIGN OF PROCESS EQUIPMENT, K. Urbaniec., C. McDermont, John Wiley and Sons, Poland, , , 1986, 147-186
15. PROCESOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR, Donald Q. Kern, Ed. Continental, México D. F.; , , 1984, 131-146, 768-812
16. PROCESS EQUIPMENT DESIGN. Vessel design., Lloyd E. Brownell, Edwin H. Young, John Wiley and Sons, U. S. A., , , 1989, 249-266
17. STANDARD BOILER ROOM QUESTIONS AND ANSWERS, Stephen Michael Elonka, Alex Higgins, Mc Graw Hill Co., U. S. A., , , 1982, 187-231
18. STANDARD HANDBOOK OF POWERPLANT ENGINEERING, Thomas C. Elliot, Mc Graw Hill publishing Co., U. S. A., , , 1989, 1.59-1.85
19. STANDARS AND TYPICAL SPECIFICATIONS FOR DEAERATORS, Heat Exchange Institute, , U. S. A., , 4th Edition, 1963, 1-23

20. STEAM, its generation and use, Babcock and Wilcox., Ed. Babcock and Wilcox company., U.S. A., , 39th Edition, 1978, 28-1 a la 35-26
21. THE CHEMICAL TREATMENT O F BOILER WATER, James. W. McCoy, Chemical Publishing Co., U.S.A. 1981, 1-12 y 65-195

TESIS

1. Instalación y pruebas de un generador de vapor., Hugo Enrique Padron Correa, Universidad Autónoma de Zacatacas, Ing. Quím. Petrolero, 1972, 21-22, 40-41 y 62-79
2. Tratamiento interno del agua para generación de energía eléctrica en una planta termoeléctrica., José Francisco Hernández García, ENEP ZARAGOZA, UNAM, Ing. Químico , 1991,

ARTICULOS.

1. BOILER CIRCULATION DURING CHEMICAL CLEANING., Barry O. Shorthouse., August 22, 1983, Chemical Engineering ., 75-79
2. BOILER WATER TREATMENT. For low and moderate pressure plants., Sheldon d. Strauss, Scott Keen and Paul Puckorius., June, 1987, Power, S·1 a la S·16
3. CONSIDER POLYMERS FOR CONTROL OF IRON OXIDE DEPOSITION, Mucci Jonh J., January, 1982, Power, 58 – 61
4. EXPERIMENTAL ESTUDIES OF BOILER TUBE METAL TEMPERATURES: Effect of heat transfer rate ind deposit thickness., C. Jacklin, Paper No. 52-A-30, 1952, ASME, 1-16

BIBLIOGRAFIA

5. CORRELATION OF SILICA CARRY-OVER AND SOLUBILITY STUDIES., C. Jacklin, s.r. bROWAR, Paper No. 51-A-91, 1951, ASME, 1-41
6. HIGH PRESSURE SYSTEMS DEMAND IMPROVED FEEDWATER QUALITY., Sheldon d. Strauss., November, 1981, Power., S-1 a la S-9
7. INSTRUMENTATION, Incresed boiler reliability with on-line particulate monitoring., R. Bryant., S. Avallone. ,M. Godfrey., January, 1994, Industrial Water Treatment, 31-35
8. INTERNAL TREATMENT FOR HIGH PRESSURE BOILERS, S. Chinnathambi, T.S. Rajan, Vol 29, No. 1 January, 1978, Chemical Age of India, 49-51
9. OPERATING BOILERS INTERMITTENTLY, Charles A. Faust, 8 July, 1985, Chemical Engineering, 115-118
10. SILICA IN BOILER WATER, P. Ghosh, October, 1988, Anti-corrosion,
11. USE OF POLYMERS TO CONTROL SCALE IN INDUSTRIAL COOLING WATER AND BOILER WATER SSYSTEMS, Claudia C. Pierce, John E. Hoots., , 1988, C.S. Sikes and A. P. Wheeler, editors, University of South Alabama Publication services., 53-57
12. THE USE OF NEW SYNTHETIC POLYSULFONATE FOR IN-SERVICE BOILER CLEANING., D.G.Cuisia, R. L. Every, December., 1978, Materials Performance., 38-40

CONGRESOS

1. WATERSIDE STUDIES IN EXPERIMENTAL HIGH PRESURE LABORATORY BOILER., By M. F. Obrecht, H. H. Bickel, J. F. Wilkes., Presented at The, 15th annual meeting International Water Conference, , The Engineer's Soc. Of water., 1954, 87-102
2. EXPERIMENTAL STUDIES OF IRON OXIDE DEPOSITS IN BOILERS., By C. Jacklin, H. Thompson., Presented at The, Proceedings of the 1950 midwest power conference., , 1950, 1 - 4
3. POLARIZATION STUDIES OF MILD STEEL IN THE PRESENCE OF CHELANTS AT HIGH TEMPERATURE, Tzu-yu Chen, Sang-Hea Shim, M. Linda Lin, Presented at The, 46th Annual conference , National Association of Corrosion Engineers, 1990,
4. PERFORMANCE OF A NEW POLYSULFONATED ADDITIVE FOR CONTROLLING BOILER SCALE, Dionisio G. Cuisia, Presented at The, Annual Conference, National Association of Corrosion Engineers, 1985, 359/1-359/10
5. COMPARISON OF ADVANCED POLYMERS FOR MINIMIZING DEPOSITS OF IRON OXIDE AND INSOLUBLE CALCIUM SALTS, W. M. Hann, S. T. Robertson, Presented at The, Annual Conference, National Association of Corrosion Engineers, 1989, 428/1-428/21
6. HTP-2: A NEW IRON DISPERSANT FOR MEDIUM TO HIGH PRESSURE INDUSTRIAL BOILERS, Scott M. Boyette, Frederick A. Elliot, Presented at The, 53th Annual meeting IWC, , The Engineer's Soc. Of water., 1992, 263-272

BIBLIOGRAFIA

7. ULTRASPERSE: A NEW ALL-POLYMER TREATMENT PROGRAM, Scott M. Soyette, Kim Jolley, Jerry Henry, Lowell Michaels, Ron Olson, Presented at The, 55th Annual meeting IWC, , The Engineer's Soc. Of water., 1994, 246-256

PATENTES:

1. POLYMERS FOR THE TREATMENT OF BOILER WATER., Fu Chen, Scott M. Boyette, Keith A. Bair, 1993, US Patent, 5,180.498
2. CARBOXYLATE POLYMERS FOR INTERNAL SCALE CONTROL AGENTS IN BIOLER SYSTEMS., Walter F. Lorenc, John G. Kelly, Frederick S. Mandel., 1996, US Patent, 4,457,847

WEB SITES.

1. <http://www.cismet.it/nicolini/lorigine.htm>
2. <http://www.kewaneeintl.com>
3. <http://www.cleaver-brooks.com>
4. <http://www.wabashpower.thomasregister.com>
5. <http://easco.com>
6. <http://www.kewanee.com>