



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Química

**DISEÑO DE UN CONDENSADOR BAROMÉTRICO TIPO BANDEJA
PERFORADA SENCILLA PARA UN SISTEMA DE EVAPORACIÓN**

Kresly Carlota Aguirre Chinchilla

Asesorado por el Ing. Orlando Posadas Valdez

Guatemala, octubre de 2010

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE UN CONDENSADOR BAROMÉTRICO TIPO BANDEJA
PERFORADA SENCILLA PARA UN SISTEMA DE EVAPORACIÓN**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA

FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

KRESLY CARLOTA AGUIRRE CHINCHILLA

ASESORADO POR EL ING. ORLANDO POSADAS VALDEZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERA QUÍMICA

GUATEMALA, OCTUBRE DE 2010

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Inga. Glenda Patricia García Soria
VOCAL II	Inga. Alba Maritza Guerrero de López
VOCAL III	Ing. Miguel Angel Dávila Calderón
VOCAL IV	Br. Luis Pedro Ortíz de León
VOCAL V	Agr. José Alfredo Ortíz Herincx
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

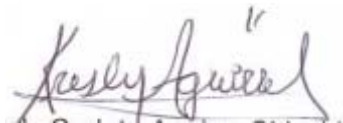
DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Otto Raúl de León Paz
EXAMINADOR	Ing. Jorge Mario Estrada Asturias
EXAMINADOR	Ing. Jaime Domingo Carranza González
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

DISEÑO DE UN CONDENSADOR BAROMÉTRICO TIPO BANDEJA PERFORADA SENCILLA PARA UN SISTEMA DE EVAPORACIÓN,

tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, en marzo 2010.



Kresly Carlota Aguirre Chinchilla



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA.

Guatemala, 26 de julio de 2010
Ref.EIQ.DOC.015.2010

Ingeniero
Williams Guillermo Álvarez Mejía
Director
Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería
Presente

Ingeniero Álvarez:

Por este medio informo a usted que el trabajo de graduación: **"DISEÑO DE UN CONDENSADOR BAROMÉTRICO TIPO BANDEJA PERFORADA SENCILLA PARA UN SISTEMA DE EVAPORACIÓN"** elaborado por la estudiante **Kresly Carlota Aguirre Chinchilla**, quien se indentifica con **carné 2006-10992**, y luego de revisión exhaustiva ha sido aprobada por el suscrito.

Atentamente,

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"

Ing. Orlando Posadas Valdéz
Asesor Trabajo de Graduación.

Cc. Archivo
OPV/am



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA

Guatemala, 08 de septiembre de 2010
Ref. EI.Q.TG.096.2010

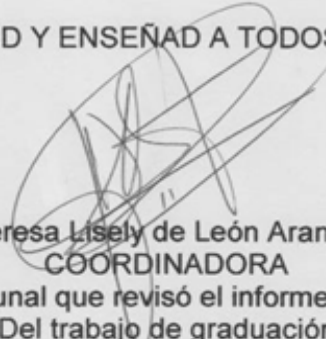
Ingeniero
Williams Guillermo Álvarez Mejía
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería
Presente.

Estimado Ingeniero Álvarez:

Como consta en el Acta TG-096-10-B-IF le informo que reunidos los Miembros del Tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del informe final del trabajo de graduación, para optar al título de INGENIERA QUÍMICA a la estudiante universitaria **KRESLY CARLOTA AGUIRRE CHINCHILLA**, identificada con carné No. **200610992**, titulado: "**DISEÑO DE UN CONDENSADOR BAROMÉTRICO TIPO BANDEJA PERFORADA SENCILLA PARA UN SISTEMA DE EVAPORACIÓN**" el cual ha sido asesorado por el Ingeniero **Orlando Posadas Valdéz**, como consta en el Acta.

Habiendo encontrado el referido informe final **satisfactorio**, se procede a recomendarle autorice a la estudiante **Aguirre Chinchilla**, proceder con los trámites requeridos de acuerdo a normas y procedimientos establecidos por la Facultad para su autorización e impresión.

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"

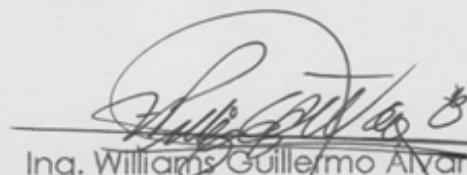


Inga. Teresa Lisely de León Arana, M.Sc.
COORDINADORA
Tribunal que revisó el informe final
Del trabajo de graduación

C.c.: archivo



El Director de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor y de los Miembros del Tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química para revisar el Informe del Trabajo de Graduación de la estudiante **KRESLY CARLOTA AGUIRRE CHINCHILLA** titulado: "**DISEÑO DE UN CONDENSADOR BAROMÉTRICO TIPO BANDEJA PERFORADA SENCILLA PARA UN SISTEMA DE EVAPORACIÓN**". Procede a la autorización del mismo, ya que reúne rigor, coherencia y calidad requeridos.


Ing. Williams Guillermo Álvarez Mejía
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química



Guatemala, octubre de 2010

Cc: Archivo
WGAM/am



Universidad de San Carlos
de Guatemala

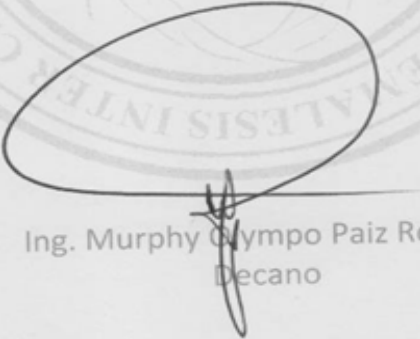


Facultad de Ingeniería
Decanato

DTG. 305.2010

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al trabajo de graduación titulado: **DISEÑO DE UN CONDENSADOR BAROMÉTRICO TIPO BANDEJA PERFORADA SENCILLA PARA UN SISTEMA DE EVAPORACIÓN**, presentado por la estudiante universitaria **Kresly Carlota Aguirre Chinchilla**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
Decano

Guatemala, 7 de octubre de 2010.



/gdech

ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Por ser mi soporte en todo momento y una fuente inagotable de fortaleza e inspiración que me permitieron alcanzar esta meta.
- Mis padres** Felix Armando Aguirre y Aguirre e Hilda Consuelo Chinchilla Alarcón de Aguirre
Con mucho amor y admiración por su esfuerzo y dedicación que formaron la persona que soy ahora.
- Mi hermano** Cristian Armando Aguirre Chinchilla
Por su apoyo, ayuda y buen ejemplo.
- Mis abuelitos** Benjamín Aguirre (D.E.P.) y Carlota Aguirre Erasmo Chinchilla y Zoila Alarcón (D.E.P.)
Por todas sus enseñanzas y cariño brindado.
- Mi familia** Con mucho cariño y aprecio a todos.
- Amigos** Por acompañarme en este camino.

AGRADECIMIENTOS A:

- Dios** El ingeniero por excelencia, por ser mi compañero incondicional en todo momento y permitirme alcanzar mis metas.
- Virgen María** Por ser madre y consejera; por ser el mejor ejemplo de humildad y fe.
- Mi padre** Felix Armando Aguirre, por su trabajo y esfuerzo. Gracias por enseñarme que las cosas que deseamos se logran trabajando día a día de una manera recta y honesta y por creer en mí.
- Mi madre** Hilda Consuelo Chinchilla de Aguirre, por su cariño y dedicación. Gracias por estar conmigo en todo momento, por sus desvelos, su dedicación y apoyo constante.
- Mi hermano** Cristian Aguirre Chinchilla, por ser mi compañero permanente en este camino. Gracias por enseñarme que la vida se lleva mejor con una sonrisa.
- Mi familia** A mis abuelitos, tíos y tías, primos, primas, sobrinos y sobrinas. Por ser parte de esa gran bendición que la vida me ha dado.

Mis catedráticos Por compartir sus conocimientos de manera desinteresada. Gracias por ayudarme a observar más allá de lo observable. En especial, al ingeniero Orlando Posadas Valdez, gracias por asesorar el presente trabajo de graduación.

Mi casa de estudio La Universidad de San Carlos de Guatemala, especialmente a la Facultad de Ingeniería y la Escuela de Ingeniería Química. Por abrirme las puertas y brindarme las herramientas que me han permitido llegar a alcanzar mis metas.

Mis amigos A todos y todas sin excepción, por estar a mi lado en todo momento; en las buenas y en las malas. Gracias por acompañarme, apoyarme y creer en mí.

A todas las personas que han confiado y creído en mí, e hicieron esto posible, agradezco a Dios hayan estado en los momentos importantes de mi vida.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	IX
LISTA DE SÍMBOLOS	XIII
GLOSARIO	XV
RESUMEN	XIX
OBJETIVOS	XXI
HIPÓTESIS	XXIII
INTRODUCCIÓN	XXV
1. ANTECEDENTES	1
2. MARCO TEÓRICO	3
2.1 Condensador barométrico: definición y funcionamiento	3
2.1.1 Estructura de un condensador barométrico	8
2.2 Balance de masa y energía en un condensador barométrico	10
2.3 Eyectores de aire	13
2.4 Diseño del equipo	15
2.4.1 Selección de materiales	20

3. DISEÑO METODOLÓGICO	25
3.1 Variables	25
3.1.1 Variables de independientes	25
3.1.1.1 Variables de proceso	25
3.1.1.2 Variables de diseño	25
2.1.2.1 Análisis de suelos	25
3.1.2 Variables dependientes intermedias	25
3.1.2.1 Variables de proceso	25
3.1.2.2 Variables de diseño	26
3.1.3 Variables finales	26
3.1.3.1 Variables finales	26
3.1.3.2 Variables independientes	26
3.1.4 Descripción operacional de las variables	27
3.2 Delimitación del área de estudio	29
3.3 Recursos disponibles	29
3.3.2 Recursos humanos	29
3.3.3 Recursos materiales	29
3.4 Técnica de recolección y procesamiento de datos	30
3.4.2 Recolección de datos	30
3.5 Procesamiento y tabulación de datos	32
3.5.1 Balance de masa en el condensador barométrico	32

3.5.2	Balance de energía en el condensador barométrico	34
3.5.3	Dimensionamiento	39
3.5.3.1	Diseño del cuerpo del condensador	40
3.5.3.1.1	Bandeja perforada	10
3.5.3.1.2	Cuerpo del condensador	45
3.5.3.1.3	Diseño de boquillas	48
3.5.3.2	Diseño de la pierna barométrica	50
3.5.3.2.1	Diámetro de la pierna barométrica	50
3.5.3.2.2	Altura de la pierna barométrica	51
3.5.4	Determinación de la eficiencia del equipo	54
3.5.5	Determinación de los materiales	55
3.5.5.1	Cuerpo del condensador	55
3.5.5.2	Bandeja perforada	56
3.5.5.3	Pierna barométrica	57
3.5.5.4	Soporte de condensador	59
4.	RESULTADOS	61
4.1	Dimensionamiento del condensador barométrico	61
4.2	Esquema del equipo	64
4.2.1	Vista frontal del condensador	64
4.2.2	Corte transversal de la vista frontal del condensador	65

4.2.3	Vista de planta del condensador	66
4.2.4	Corte transversal de vista de planta del condensador	67
4.2.5	Diagrama del diseño para el soporte del equipo	68
4.2.6	Diagrama de flujo del condensador barométrico	69
4.3	Caracterización del condensador barométrico	70
5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	71
5.1	Dimensionamiento del condensador barométrico	71
5.2	Equipos y accesorios complementarios	73
5.3	Diseño y especificaciones del condensador	76
	CONCLUSIONES	79
	RECOMENDACIONES	81
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	83
	ANEXOS	85
	ANEXO 1. Tabla de requisitos académicos	85
	ANEXO 2. Diagrama de causas y efectos del problema	89
	ANEXO 3. Propiedades del acero 4CR12	91
	ANEXO 4. Instalación correcta del condensador barométrico	93
	ANEXO 5. Caracterización de eyectores de gases no condensables	95

APÉNDICE	97
APÉNDICE 1. Proceso de diseño	97
1. Macroanálisis	98
2. Microanálisis	99
3. Búsqueda de alternativas	100
4. Selección preliminar	101
5. Desarrollo del modelo	104
6. Evaluación económica	105
7. Presentación técnica	106
8. Proceso de diseño del condensador barométrico	107
APÉNDICE 2. Equipos y accesorios complementarios	111
1. Caracterización de bridas y pernos	111
2. Caracterización de la bomba	113
3. Caracterización de eyector de gases no condensables	115
APÉNDICE 3. Análisis de costos	119
1. Costo del cuerpo de evaporador	119
2. Costo de la pierna barométrica	122

3. Costo de la bandeja perforada	124
4. Costo total del condensador	127
APÉNDICE 4: Presentación final del condensador (Planos)	129
1. Vista frontal	131
2. Vista de planta	133
3. Estructura de soporte del equipo	135
3. Diagrama de flujo del sistema	137

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1	Condensadores barométricos tipo spray	4
2	Condensador barométricos de bandejas	5
3	Estructura de un condensador barométrico en contracorriente	8
4	Relaciones asociadas al balance de energía térmica	11
5	Eyector de gases no condensables	13
6	Diagrama de flujo de procesamiento de datos	31
7	Diagrama de flujo del condensador barométrico (Balance de masa)	32
8	Diagrama de flujo del condensador barométrico (Balance de energía)	34
9	Condensador barométrico tipo spray de bandeja sencilla.	39
10	Diseño de la bandeja perforada	40
11	Diseño del cuerpo del condensador	45
12	Diseño de la pierna barométrica	53
13	Diseño del soporte del condensador barométrico	60
14	Vista frontal del condensador	64
15	Corte transversal vista frontal	65
16	Vista de planta	66

17	Corte transversal de vista de planta	67
18	Estructura de soporte para el condensador barométrico	68
19	Diagrama de flujo del sistema de condensación	69
20	Causas y efectos del problema	89
21	Correcta instalación de línea de vapor	93
22	Correcta instalación de línea de gases	93
23	Salida de mezcla de la pierna	94
24	Instalación de la pierna	94
25	Curva para el diseño óptimo de eyectores simples	95
26	Método de la caja negra para el macroanálisis del problema	98
27	Método de la caja negra para el microanálisis del problema	99
28	Método del árbol de alternativas	100
29	Macroanálisis del condensador	107
30	Mircroanálisis del condensador	107
31	Selección de alternativas	108
32	Desarrollo del modelo	110
33	Dimensiones del cuerpo del condensador	119
34	Dimensiones de la pierna barométrica	122
35	Dimensiones de la bandeja perforada	124

TABLAS

I	Descripción metodológica de las variables del proceso	27
II	Resumen de flujos en el condensador	38
III	Diseño del condensador barométrico	59
IV	Caracterización del condensador barométrico	69
V	Requisitos académicos para el diseño de equipo	85
VI	Rangos de composición del acero 4CR12	91
VII	Propiedades mecánicas del acero 4CR12	91
VIII	Propiedades físicas del acero 4CR12	92
IX	Especificaciones por grado del acero 4CR12	92
X	Posibles alternativas para el acero 4CR12	92
XI	Caracterización de bridas para el condensador barométrico	111
XII	Caracterización de pernos para bridas	112
XIII	Caracterización de eyector de gases no condensables	115
XIV	Costo del condensador barométrico	127

LISTA DE SÍMBOLOS

Δ	Cambio o gradiente.
ΔZ	Cambio de altura.
abs	Unidad absoluta.
bar	Unidad de medida de presión.
cm	Centímetro.
C_p	Capacidad calorífica.
DDF	Diagrama de flujo.
DN	Diámetro nominal.
ft	Pie, unidad de medida de longitud.
g	Aceleración por la gravedad
g_c	Compatibilizador de unidades.
H	Entalpía.
h	Altura.
HFT	Cabeza de fricción total.
kg	Kilogramo.
lb	Libra
m	Metro.
\dot{m}	Flujo másico.

mmHg	Presión en dimensión de milímetros de mercurio.
P	Presión.
Q	Caudal en flujo volumétrico
S	Entropía
SS	Acero inoxidable
s	Segundo
T	Temperatura
ton	Tonelada corta
TM	Tonelada métrica.
ρ	Densidad
η	Eficiencia
Σ	Sumatoria
π	Constante pi.
μ	Viscosidad.
λ	Calor latente de vaporización.

GLOSARIO

Adiabático	Sistema que no gana ni cede energía a los alrededores.
Adaptabilidad	Capacidad de un equipo de ser compatible con el resto del sistema y adaptarse ante cambios en las variables de manejo en el mismo.
Barométrico	Instrumento cuya función es mantener una presión determinada.
Bifásico	Sistema conformado por dos fases delimitadas por límites definidos.
Bomba	Máquina que eleva, comprime y transporta fluidos.
Boquilla	Cilindro pequeño por medio del cual fluyen diversas sustancias.
Brida	Pieza metálica utilizada para ensamblar tubos del mismo o diversos diámetros, fijándolos con ayuda de otras piezas denominadas pernos.

Calor	Manifestación de la energía interna que un sistema posee.
Calor latente	Cantidad de energía que un sistema posee mientras cambia de estado, la cual no se manifiesta mediante un cambio de temperatura.
Compatibilidad	Adaptabilidad de un equipo con otros equipos o sistemas ya existentes.
Compresor	Aparato utilizado para comprimir fluidos y algunos sólidos poco comprimibles.
Condensado	Producto del cambio de fase de una sustancia de fase gaseosa hacia fase líquida.
Contracorriente	Dos corrientes que fluyen en direcciones opuestas entre sí.
Eficacia	Capacidad de un equipo de realizar la función para la cual fue diseñado.
Eficiencia	Relación entre los insumos consumidos por el condensador, agua y vapor y el producto obtenido. Para el condensador barométrico la eficiencia se mide en términos energéticos.
Energía	Capacidad para realizar un trabajo o para producir algún cambio en un observable.

Entalpía	Magnitud termodinámica, cuya variación expresa una medida de la cantidad de energía absorbida o cedida por un sistema.
Entropía	Medida de energía que se pierde en un sistema por la tendencia molecular del mismo hacia el desorden.
Equilibrio	Ausencia de cambio en cualquier característica de un sistema, a través del tiempo.
Estable	Cuya composición y propiedades no son dependientes del tiempo. Que no presenta cambios en su estado de reposo o movimiento.
Eyector	Aparato utilizado para remover determinada sustancia de un equipo o sistema.
Hidrostática	Presión correspondiente a la cantidad de agua que se encuentre en determinado sistema.
Inversión	Cantidad de capital destinado para la obtención de un beneficio.
Refrigerante	Fluido utilizado para disminuir la temperatura de otro cuerpo o sustancia.

Saturación	Estado en el que un sistema ha alcanzado el nivel máximo con respecto a un observable.
Tobera	Pieza de metal cilíndrica con cabeza redonda por un extremo y asegurada por una tuerca por el otro, que se usa para sujetar piezas de gran peso o volumen.
Vacío	Condición de encontrarse por debajo de la presión atmosférica.
Versatilidad	Capacidad de un equipo para ser utilizado para diversos fines y bajo diversas condiciones de proceso y ambientales.
Volátil	Relativo a las sustancias que poseen una mayor tendencia a permanecer en estado gaseoso que en su estado líquido o sólido.
Volumen específico	Volumen total ocupado por unidad de masa.
Zapata	Superficie de concreto armado sobre la que descansan las columnas de una estructura.

RESUMEN

En el desarrollo del presente trabajo de graduación se realizó el diseño integral de un equipo de condensación en el sistema de evaporación para un ingenio azucarero. El equipo diseñado es un condensador barométrico de bandeja perforada sencilla, para lo cual fue necesario utilizar datos provenientes de un sistema de evaporación y posteriormente generar criterios de diseño. Al mismo tiempo, fue necesario realizar una compilación de cálculos, datos y teorías que permitieron el diseño adecuado del equipo.

El tema de trabajo de graduación desarrollado en el presente documento fue eminentemente de estudio en campo y tiene como resultado final la obtención de un juego de planos en los cuales se especifican las partes, dimensiones, materiales, accesorios y equipos que el condensador barométrico necesita para operar en el sistema evaluado. De este modo, se pudo determinar que la eficiencia teórica del equipo diseñado es de 85,98%. Mientras que su costo de inversión inicial es de Q450 000,00.

OBJETIVOS

GENERAL

Realizar el diseño de un condensador barométrico para un sistema de evaporación en un ingenio azucarero cuya eficiencia teórica supere el 85,00%.

ESPECÍFICOS

1. Realizar una compilación de conceptos, teorías y cálculos matemáticos para el diseño de un condensador barométrico.
2. Elaborar el desarrollo del diseño de un condensador barométrico para las especificaciones establecidas.
3. Desarrollar un juego de planos en los cuales se especifique las partes, dimensiones y materiales del condensador barométrico a través del diseño.
4. Determinar el monto total de la inversión inicial para el equipo diseñado y la vida útil del mismo.

HIPÓTESIS

Es posible diseñar un condensador barométrico para un sistema de evaporación en un ingenio azucarero con una capacidad de 200 ton/h de vapor vivo y con una eficiencia superior al 85,00%

INTRODUCCIÓN

Diseño es el proceso previo de configuración mental de búsqueda de una solución en cualquier campo. Del proceso de diseño depende en gran parte el grado de confiabilidad y eficiencia que se obtiene del equipo al final. Dicho proceso no puede hacerse de manera improvisada, sino que debe realizarse mediante un método genérico, lógico y completo, que permita observar el problema de una manera global y finalmente llegar a elegir la mejor opción. El proceso genérico para el diseño de equipos industriales¹ incluye etapas sucesivas de macroanálisis, microanálisis, búsqueda de alternativas, selección preliminar, desarrollo de modelo, evaluación económica y presentación técnica final. Este proceso implica tomar en cuenta aspectos operativos, funcionales y económicos a fin que se pueda construir el equipo con el menor costo y con la mayor seguridad y operabilidad.

Durante el desarrollo del presente trabajo de investigación, se buscó realizar el diseño de los condensadores de uso más común en la industria azucarera, los condensadores barométricos. Este diseño integral deberá ser el resultado final de una investigación tanto de conceptos como de datos, y de un proceso lógico, completo y detallado. Este trabajo posee como objetivo final llegar a un diseño óptimo con alta eficiencia y eficacia.

Mediante este trabajo se pudo llegar a obtener una serie de planos que detallan completamente el condensador barométrico para el sistema de evaporación del ingenio azucarero. Los mismos son acompañados por las especificaciones técnicas para el montaje adecuado del equipo.

¹ REFERENCIA: Posadas, Orlando. Elegancia en el Diseño. Centro de Innovación Tecnológica CENIT

1. ANTECEDENTES

Los condensadores barométricos han sido utilizados en sistemas de evaporación de azúcar debido a que conllevan ventajas operativas. El vacío que el condensador barométrico genera en el sistema permite trabajar todo el proceso de evaporación a temperaturas por debajo de la temperatura de inversión del azúcar. La sacarosa es un producto que debe ser procesado bajo condiciones controladas de presión y temperatura, ya que siendo un polisacárido, se descompone en los monosacáridos que la componen al llegar a determinada temperatura. La inversión de la sacarosa tiene costo económico que trata siempre de evitarse.

A través de los años, los condensadores barométricos han sido diseñados para desempeñar adecuadamente su función. Sin embargo, en las últimas décadas, el diseño se ha enfrentado con otras restricciones: la protección ambiental y la competitividad. Esto lleva a diseñar no sólo un equipo eficaz, sino también eficiente y que represente bajos costos de producción. En un condensador barométrico se puede reducir tanto los costos como el impacto ambiental, reduciendo el consumo de agua. Mientras que también se pueden reducir los costos mediante la selección adecuada del equipo.

El diseño adecuado del condensador barométrico permite que el sistema de evaporación en el ingenio azucarero funcione bajo parámetros controlados, obteniendo así el producto deseado. Así mismo, un adecuado diseño permite controlar la operación del equipo de tal manera que consuma la menor cantidad de insumos. Por lo tanto, se puede decir que es durante la etapa del diseño del equipo que se pueden optimizar tanto el proceso como los costos.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Condensador barométrico: definición y funcionamiento

El condensador barométrico es un equipo de alta confiabilidad para condensar el vapor proveniente de los evaporadores de múltiple efecto y producir vacío en el sistema. Es un condensador de contacto directo en el que el agua es rociada como *spray* y el vapor puede fluir en paralelo o en contracorriente.

Una de las principales ventajas del condensador barométrico es que el agua de inyección se puede descargar a través de una pierna por gravedad, sin requerir una bomba de vacío. Además que en el condensador barométrico no hay piezas móviles, por lo que el costo de mantenimiento es bajo; requiere poco espacio y es fácil de instalar.

En un condensador barométrico a contracorriente, el vapor de escape entra al condensador por la parte inferior se pone en contacto directo con los chorros de agua y se condensa; los chorros de agua alcanzan una velocidad suficiente para arrastrar el vapor condensado, no así el aire y los gases no condensables. No se requiere bomba alguna para evacuar el agua, ya que esta fluye por gravedad.

Estos condensadores son apropiados en lugares en los que hay abundante agua fría de buena calidad (arroyos de montaña). La condensación puede mejorarse automatizando el agua fría.

A continuación se presentan los esquemas de los condensadores de contacto directo a contracorriente más comunes.

Figura 1. Condensadores barométricos tipo spray

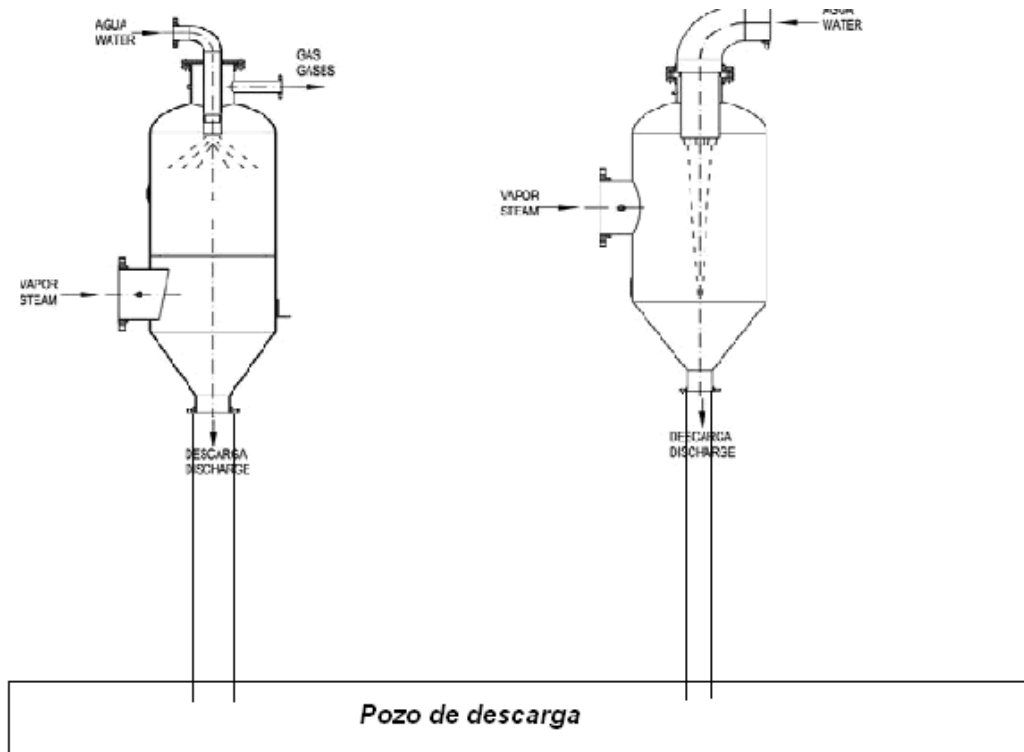
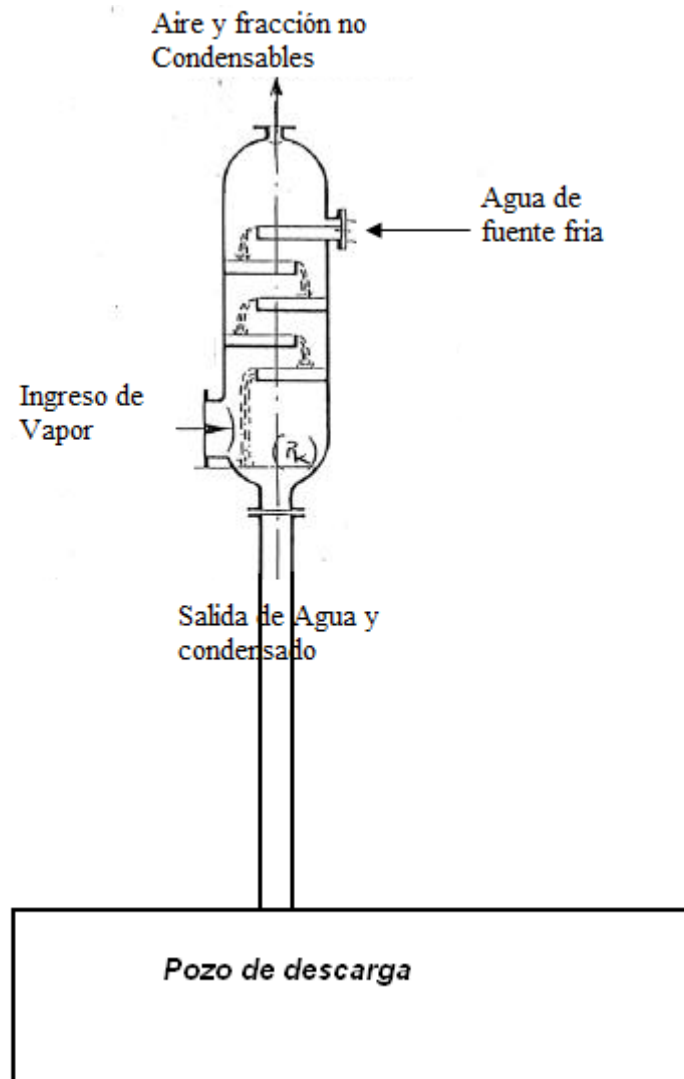


Figura 2. Condensador barométrico de bandeja



En los condensadores barométricos en contracorriente, el vapor del jugo entra al condensador cerca de la parte inferior, se eleva a través de la corriente de agua que cae y se condensa conforme se aproxima a la salida inferior. Los gases no condensables se acumulan en la parte superior. El condensador cuenta con dispositivos para la remoción de estos gases no condensables que entran con el vapor o con el agua. La rápida reducción del volumen del vapor que se transforma en agua produce vacío, y bombeando el agua de la parte baja del condensador, tan pronto como se va formando, se podría mantener el vacío así creado.

En un condensador barométrico de flujo contracorriente, el vapor de jugo entra al condensador por la parte inferior, fluye hacia arriba y se condensa a medida que cede su calor latente al agua de condensación. El agua de condensación fluye hacia abajo a una velocidad controlada mientras que los gases no condensables son extraídos en la parte superior del equipo.

En la pierna barométrica entra la mezcla resultante de la condensación a vacío líquida y se descarga al pozo de agua caliente. Esto hará que la columna del líquido en la pierna barométrica descienda automáticamente manteniendo la diferencia hidrostática entre el vacío de operación y la presión atmosférica. Por lo tanto el condensador necesita una pierna barométrica para remover el agua sin perder el vacío, manteniendo una carga hidrostática.

Si no hay aire o gases no condensables presentes en el vapor que llega al condensador, solamente sería necesario condensar el vapor y extraer el condensado, con el objeto de crear y mantener el vacío. Sin embargo, como es prácticamente imposible evitar la entrada de aire y otros gases no condensables al interior del condensador, fue necesario hacer uso de una bomba de vacío o un eyector para mantener el vacío en el interior del condensador.

La función primaria del condensador puede ser considerada, por lo tanto, como la de producir y mantener una baja presión para permitir la evacuación.

La condensación del vapor evacuado de un evaporador puede llevarse a cabo en una u otra de las siguientes formas.

1) Por medio de automatización de agua relativamente fría en una cámara, a la cual se envía el vapor de evacuación del evaporador (condensador de mezcla).

2) Haciendo fluir el vapor de evacuación sobre un cierto número de tubos de metal enfriados interiormente por una corriente relativamente fría de agua de circulación (intercambiador del tipo indirecto o de superficie).

En ambos casos:

a) La cámara del condensador debe ser cerrada, para evitar la pérdida del vacío debido a las entradas de aire.

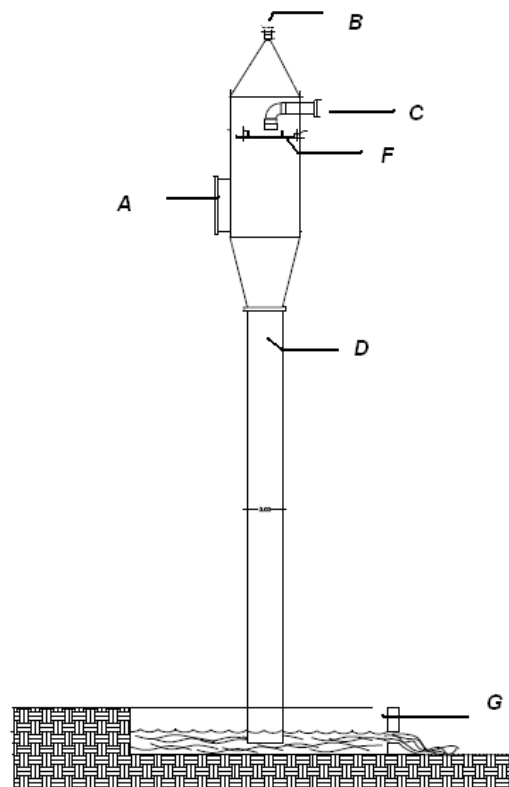
b) El vapor condensado o agua debe ser extraído en forma continua, para permitir un flujo constante de vapor de evacuación dentro de la cámara de condensación.

c) Se debe agregar los dispositivos que permitan la extracción del aire y otros gases no condensables que podrían entrar en el condensador, ya sea debido a pequeñas fugas, o con el vapor. Esto es necesario con el objeto de mantener el vacío.

2.1.1 Estructura de un condensador barométrico

A continuación se presenta un esquema de un condensador barométrico de tipo spray de bandeja simple con flujo en contracorriente. Los vapores ingresan al equipo por “A”, luego van ascendiendo a medida que se van enfriando y condensando por el contacto con el agua fría. El agua fría ingresa al condensador por “C” y luego cae por los platos. El conducto “B” está conectado a una bomba de vacío y es por donde salen los gases no condensables.

Figura 3. Estructura de un condensador barométrico en contracorriente



El conducto “D” son salidas que permiten evacuar el agua de refrigeración junto con los productos condensables, además de servir como un sello para mantener el vacío en el interior del condensador barométrico. Este conducto es lo que anteriormente se mencionó como pierna barométrica. La longitud de la misma puede variar, según la localización geográfica y la presión de vacío a la que se desee llegar. Generalmente se desea un vacío casi perfecto.

La sección “F” del esquema señalado en la figura 3 representa la bandeja perforada. Esta bandeja permite distribuir el agua de condensación uniformemente por el cuerpo del condensador. Cuenta con un agujero central, con agujeros periféricos y con un labio de desbordamiento. Los agujeros periféricos permiten regular la velocidad a la que fluye el 80% del agua de condensación. Mientras que el labio de desbordamiento permite que el agua moje las paredes del cuerpo del condensador.

El diseño de los condensadores barométricos puede variar, mas no significativamente; la estructura presentada no es la estructura más común que se utiliza en las industrias actualmente, sin embargo, este diseño representa altas eficiencias y bajos costos de inversión inicial y de mantenimiento.

Las principales diferencias entre los distintos condensadores barométricos consisten en el sistema de distribución de agua a través del cuerpo del condensador. En el diseño mostrado en la figura 3, el agua forma cortinas al tiempo que fluye por las distintas bandejas, generando así un tiempo de contacto adecuado entre ambas fases.

2.2 Balance de masa y energía en un condensador barométrico

Todos los productos que entran en una operación salen como productos y como residuos. Un balance de masa se define como la verificación de la igualdad cuantitativa de masa que debe existir entre los insumos de entrada y los productos y residuos de salida.

El balance de masa usualmente se realiza utilizando unidades de peso, ya que la magnitud de los volúmenes cambia con la temperatura. El balance de masa es aplicable a cualquier proceso y a cualquier operación unitaria a través de la siguiente ecuación genérica:

$$\text{Entradas} + \text{Masa residente inicial} = \text{Salidas} + \text{Masa residente final} + \text{Pérdidas no identificadas.}$$

ECUACIÓN No. 1

En el caso específico del condensador barométrico la masa total de vapor y agua de enfriamiento entrante debe ser igual a la sumatoria de las salidas del condensador. Entre las salidas se tiene la mezcla del condensado con agua y los gases no condensables.

Los gases no condensables entran al condensador como fracciones en el vapor y agua de alimentación, por lo que estas fracciones deben ser tomadas en cuenta para realizar el balance de masa del equipo.

La masa residente inicial y final para el condensador barométrico analizado deben ser consideradas como cero. Pero es importante tomar en

cuenta que las velocidades de alimentación y de evacuación no son las mismas.

El balance de energía se puede realizar utilizando el mismo método que en el balance de masa en cada operación unitaria o en los procesos en donde intervenga energía. Se puede realizar un balance adecuado de la energía térmica por medio de las relaciones que indica el siguiente cuadro:

Figura 4. Relaciones asociadas al balance de energía térmica

Energía de entrada (E_E):	Energía de salida (E_S):	Balance de Energía:
E_E = Suma de todas las energías de entrada	$E_S = E_U + E_P$ $E_P = E_D + E_R$ $E_S = E_U + E_D + E_R$	$E_E = E_S$
Significado de los subíndices:		
E = Entrada o energía total suministrada; S = Salida; U = Energía útil o aprovechada en el Producto; P = Energía perdida o no aprovechada; D = Deficiencias o fugas; R = Residual o de rendimiento termodinámico		

En el condensador barométrico el balance de energía, balance entálpico, se debe dar entre la entalpía inicial tanto del agua como del vapor de alimentación y la entalpía resultante de la mezcla. La entalpía de salida de los gases no condensables puede ser despreciada.

El cambio de entalpía del agua de enfriamiento puede ser planteada en términos del cambio de temperatura al considerar $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ como la temperatura de referencia para la entalpía y asumir la capacidad calorífica como una constante.

El cambio de entalpía en el condensado debe ser planteado en términos del calor latente de condensación, ya que en este no existe un cambio de temperatura.

El balance de energía en un condensador barométrico puede calcularse cuantificando las energías que entran y salen de él. La energía que entra está formada por:

- Energía cinética del vapor entrante.
- Entalpía del vapor entrante.
- Energía cinética del agua entrante.
- Entalpía del agua entrante.
- Energía potencial del agua entrante.

La energía que sale está formada por:

- Energía cinética de la mezcla a la salida del condensador.
- Entalpía de la mezcla.
- Energía potencial de la mezcla.

Sin embargo, considerando un condensador real, las energías cinética de entrada y salida del agua de circulación son pequeñas y se puede considerar que se anulan una con otra, las energías cinética de entrada del vapor y salida de condensado así como las energías potenciales pueden despreciarse. De esta manera, las energías resultantes para el balance de energía dentro del condensador son:

- Entalpía de entrada del vapor y agua de enfriamiento.
- Entalpía de salida de la mezcla.

Los balances tanto de masa como de energía del condensador barométrico para el sistema estudiado en el presente trabajo puede ser consultado en la sección No. 3.3 del mismo.

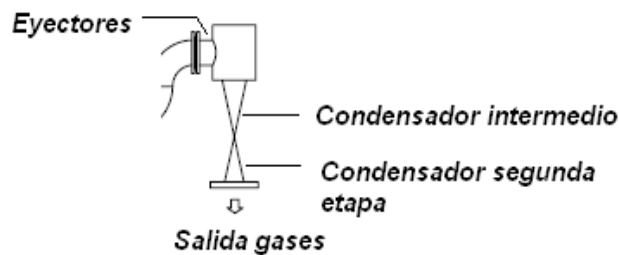
2.3 Eyectores de aire

La función de los eyectores de aire es la eliminación del aire y de gases no condensables del condensador. Un eyector de aire no es más que una bomba de chorro en la que no existen partes móviles. El flujo a través de eyector se toma del colector de 2 psig de vapor.

El grupo de eyección de aire está formado normalmente por:

- Eyector de aire de la primera etapa.
- Condensador intermedio.
- Eyector de aire de la segunda etapa.
- Condensador posterior.

Figura 5. Eyector de gases no condensables



Los dos eyectores (1^a y 2^a etapa) trabajan en serie, el primero de ellos aspira de 3,81 pulgadas de mercurio (abs) del condensador, y eleva esa presión hasta 17,78 pulgadas (abs); en la segunda etapa, el eyector aumenta la presión de 7 pulgadas a 32 pulgadas (abs).

El eyector de la primera etapa aspira del condensador principal y descarga la mezcla de aire-vapor al condensador intermedio en el que el vapor contenido en la mezcla, se condensa. El condensado cae al fondo del condensador, de donde, a través de un cierre hidráulico en U pasa el condensador principal.

El aire pasa ahora a la aspiración de la segunda etapa donde mezclado con el chorro de vapor es conducido al condensador posterior, en éste, el vapor se condensa y se manda al tanque de purgas en tanto que el aire se envía a la atmósfera.

Comercialmente los eyectores son caracterizados por medio de un coeficiente. Dichos coeficientes relacionan el flujo de succión con el flujo de descarga. La caracterización del eyector de gases no condensables para el sistema evaluado en el presente trabajo debe consultarse el *Apéndice No. 2*.

Para permitir un funcionamiento continuo, se utilizan dos juegos de eyectores, sin embargo solo uno es necesario y suficiente para el funcionamiento de la planta. El otro está en todo momento listo para funcionar en caso de avería o defectos de funcionamiento del primero, o bien, como medio alternativo durante mantenimiento preventivo. Ambos pueden utilizarse simultáneamente en caso que una entrada excesiva de aire en el condensador haga necesario una capacidad adicional de extracción de aire.

2.4 Diseño del equipo

El diseño se define como el proceso previo de configuración mental en búsqueda de una solución en cualquier campo. Diseñar requiere principalmente consideraciones mentales o estéticas. Lo cual necesita numerosas fases de investigación, análisis, modelado, ajustes y adaptaciones previas a la elaboración definitiva del equipo. Diseñar comprende la integración de requisitos técnicos, sociales y económicos.

El diseño es una fase fundamental para toda evaluación económica, ya que permite visualizar el proyecto de una manera clara y global. A través de un diseño preliminar de un equipo se pueden obtener datos tanto de costos fijos como de costos variables. Ya que con el diseño se define tanto la capacidad del equipo como el material y la mano de obra que se necesitará para construir el mismo. Así mismo, el diseño adecuado del equipo es indispensable para obtener mayores eficiencias y menores costos de operación.

La fase de diseño de un equipo es un proceso complejo que se debe dividir en varias etapas. Es necesario inicialmente observar el problema al que se desea dar solución como un todo para posteriormente ir definiendo variables, criterios, requisitos y limitaciones. Y de esta manera seguir una secuencia lógica de pasos para finalmente poder llegar al diseño adecuado. En el *Apéndice 1* se puede encontrar una descripción de las etapas del diseño de equipo así como su aplicación al diseño del condensador barométrico.

Si se sigue de una manera adecuada cada una de las partes del proceso de diseño que deberá llegar finalmente a la presentación técnica de un equipo diseñado de manera óptima, para el problema y el sistema planteado inicialmente.

Como en cualquier proceso de diseño, el primer paso es observar el problema a resolver como un todo, para poder comprenderlo y posteriormente plantear una solución adecuada al mismo. Cuando ya se tiene un esquema mental de cuál o cuáles son las soluciones más viables al problema planteada es necesario evaluar varias posibles opciones, equipos en este caso, para solucionar la situación de la manera más eficaz y al menor costo posible.

En el caso del diseño del condensador barométrico, es necesario evaluar los distintos tipos de estos condensadores que existen disponibles en la industria y determinar cuál es el adecuado para las condiciones de proceso a las cual estará sometido.

Un gran número de diversos diseños de condensadores barométricos son discutidos en la literatura. Sin embargo, uno de los condensadores más eficientes utilizados en la actualidad para la condensación en el proceso de producción de azúcar es el condensador barométrico de bandeja simple tipo spray. Este condensador presenta una gran área de contacto y permite controlar el tiempo de contacto por medio de sus diversas perforaciones circundantes y el área de desbordamiento. Además, al sólo poseer una bandeja, representa menores costos de inversión y de mantenimiento que el condensador barométrico de bandejas múltiples.

Una de las partes más complejas para el diseño del condensador barométrico tipo spray de bandeja simple es precisamente el diseño de la bandeja. En la misma, un 10% del total del agua de enfriamiento que entra en el condensador debe fluir por un agujero central que se encuentra en la bandeja, mientras que otro 10% debe desbordar la misma mojando así las paredes del condensador. Esto permite una mejor condensación ya que la mayor parte de la condensación se da en las paredes del condensador. Mientras tanto, el último 80% del agua debe fluir por los agujeros circundantes distribuidos

uniformemente por toda la bandeja, creando así una cortina de agua de enfriamiento. De esta manera se asegura que todo el cuerpo del condensador se encuentre inundado por una lluvia controlada de agua de enfriamiento.

Es importante resaltar que el 15% de la periferia de la bandeja no debe poseer agujeros. Con esto se evita que el agua que fluye por los agujeros circundantes choque con el agua que desborda la bandeja, formando así una sola capa gruesa de agua que impediría la condensación del flujo total de vapor que entra en el condensador. Para evitar estas capas gruesas de agua, es necesario mantener un pitch adecuado y se recomienda un ordenamiento de agujeros triangular.

La bandeja debe estar colocada en un orden de 6 ,5 a 8 pies por encima del centro de la tubería de entrada del vapor. Esta altura permite un contacto adecuado entre el agua y el vapor. Además es importante tomar en cuenta la velocidad a la que el agua debe caer para que la condensación se lleve a cabo. Esta velocidad está limitada tanto por la altura de la bandeja, como por el número y el diámetro de agujeros y el pitch entre ellos.

Los sectores que conectan el cuerpo del condensador con las tuberías de eyección deben poseer una forma esférica o triangular para crear una resistencia mecánica y evitar una caída de presión drástica. En caso que las secciones de resistencia mecánica sean triangulares, los ángulos de las mismas no deben sobrepasar los 30° , ya que de lo contrario la resistencia mecánica que los lados del triángulo producen se vuelve despreciable.

La salida de gases no condensables debe ser de un tamaño cuya velocidad lineal de eyección sea de aproximadamente 49 ft/s. La boquilla de entrada del vapor debe ser de un tamaño de manera que la velocidad lineal de ingreso del mismo sea de alrededor 196 ft/s. Mientras tanto, la boquilla de

entrada del agua de enfriamiento al condensador debe corresponder a una velocidad lineal de entrada de 6 ft/s. Estas velocidades de flujo condicionan el proceso de condensación al mismo tiempo que ayudan a prolongar la vida útil del equipo.

Una de las partes fundamentales en el diseño del condensador barométrico es la pierna barométrica. Pues es la que permite determinar y ajustar la presión a la que se trabajará en el equipo. El diámetro del mismo debe ser tal que la velocidad de eyección sea de 0,98 ft/s.

Las dimensionales más relevantes en la pierna barométrica con su altura y diámetro. Además, a la altura de la pierna barométrica debe ser agregada la longitud de la pierna que entrará en el pozo de descarga y que servirá como soporte para el resto del equipo. Es recomendable que la pierna barométrica cubra una extensión de por lo menos dos pies adicionales para el soporte del equipo. Además de la longitud de soporte adicional de la pierna, también es aconsejable que se agreguen $\frac{1}{2}$ pie más de la pierna bajo el nivel del agua. Por otro lado, muchas veces no es suficiente con el soporte brindado por la pierna barométrica, por lo que es necesario asegurar el cuerpo del condensador con dos o cuatro soportes de acero al carbón para mayor seguridad.

Existen otras consideraciones que deben ser tomadas en cuenta para el diseño del condensador, las cuales, aunque no forman parte del esquema principal; ayudan a que el equipo funcione de la manera adecuada y mantenga las condiciones de trabajo deseadas. Es importante la determinación del tipo de soldadura que se utilizará para la construcción del equipo. Una adecuada soldadura del equipo evita fugas dentro de mismo y ayuda a mantener el vacío deseado.

Otro de los factores que deben ser tomados en cuenta durante el diseño de un equipo son los accesorios. Las bridas son las partes que conectan el cuerpo del condensador con las tuberías de alimentación y descarga. Estas deben ser caracterizadas según las necesidades del condensador; ya que estas deben evitar un elevado cambio de presión entre el cuerpo del condensador y las tuberías. Es importante destacar que las bridas deben ser debidamente caracterizadas, al igual que los pernos con los que se aseguran las mismas; de manera que estas puedan soportar los cambios de presión y demás condiciones de trabajo.

Los codos y tuberías auxiliares también ayudan a prevenir la caída de presión durante el trasiego de los distintos fluidos. En algunas conexiones es suficiente con utilizar codos de 90°, sin embargo, en algunas conexiones es necesario el uso de 1 o 2 codos a 45° para evitarla caída excesiva de presión. Para generar criterios sobre la conexión e instalación del condensador barométrico se sugiere consultar el *Anexo 4*.

Por último, es importante tomar en cuenta los accesorios de medición y de operación; los cuales permiten controlar las condiciones a las que el condensador está operando. Entre estos equipos auxiliares se puede mencionar vacuómetro, manómetro y termómetro, los cuales permiten controlar la presión de vacío que se está alcanzando mediante el proceso de condensación. Estos instrumentos permiten llevar un monitoreo continuo y tomar decisiones en el supuesto que el equipo no esté operando a las condiciones esperadas. Cuando las condiciones de vacío requeridas no se están alcanzando con el proceso de condensación es necesario aumentar la cantidad de gases extraídos por medio del eyector.

Parte fundamental en el diseño de equipo es tomar en cuenta diversos factores de seguridad. En condensador barométrico presenta un riesgo potencial al poseer un cuerpo ancho y pesado sobre una pierna de 34 pies cuyo diámetro es tres veces menos que el cuerpo metálico que la misma sostiene. La pierna por sí misma constituye un soporte para el equipo al estar un pie por debajo de la tierra. Sin embargo, es necesario agregar más soporte al cuerpo del equipo. Es por ello que es necesario agregar sobre el cuerpo del equipo dos soportes metálicos a lados opuestos del cilindro. Dichos soportes deben reposar sobre columnas de concreto reforzado. Las columnas de soporte deberán poseer forma de marco para poder distribuir el peso de manera adecuada y mejorar así la seguridad del equipo.

2.4.1 Selección de materiales

La corrosión es la causa principal del deterioro de los equipos de la industria química. La mayoría de destrucciones pueden prevenirse escogiendo adecuadamente los materiales dentro de la gama muy amplia que dispone el ingeniero. Entre ellos se encuentran una gran variedad de metales, plásticos, materiales cerámicos y pinturas.

En las plantas que operan en continuo, las pérdidas en producción debido a deterioros por corrosión son tan costosas que justifican los materiales más costosos. En instalaciones más sencillas, puede ser más económico seleccionar materiales de menor costo y programar limpiezas frecuentes de los equipos para prevenir la corrosión.

Para la selección del material a utilizar en los distintos equipos dentro de una planta es necesario tomar en cuenta los siguientes factores:

- Tamaño de planta
- Condiciones de trabajo
- Tipo de corrosión
- Adecuada información de los materiales que se puedan escoger
- Características frente a la corrosión
- Cuestiones económicas

Para asegurar la solución más económica en problemas de corrosión, es necesario estudiar el tipo de corrosión que tiene lugar y conocer las condiciones a las que opera el equipo, tanto las normales como los posibles casos circunstanciales; como en paradas o puestas en marcha.

No suele ser interesante económicamente diseñar una planta que esté totalmente libre de corrosión. Velocidades de 0,1 mm/año y hasta 6 mm/año suelen ser tolerables, dependiendo del costo de los materiales alternativos; y del grado de contaminación que puede aceptarse. En caso de temperaturas muy elevadas, es necesario utilizar el teflón; a pesar de su costo muy elevado y de su difícil aplicación y procesado.

A menudo la corrosión puede ser atendida mejor cuidando pequeños detalles en el diseño que seleccionando los materiales más resistentes y costosos. Algunos ácidos concentrados en frío suelen transportarse en tubos de acero al carbono, siempre que la velocidad de circulación sea inferior a 1 m/s. Debido a ello, es mejor utilizar tuberías de acero al carbono de diámetros grandes que de acero inoxidable de diámetros pequeños.

La corrosión por picaduras de aceros inoxidable en condensadores se puede prevenir eliminarse los restos de productos remanentes cuando no se utiliza el equipo. Por lo general en los condensadores no se requiere materiales sumamente resistentes a la corrosión, ya que el condensado es un líquido de alta pureza.

El acero inoxidable 3CR12 es un tipo de acero de características soldables y estructural. Acero resistente a la corrosión que contiene un cromo nominal del 12%. Este tipo de acero fue desarrollado originalmente como un material alternativo de construcción de materiales tales como acero al carbono, galvanizado, entre otros, donde las propiedades mecánicas y resistencia a la corrosión de estos materiales eran inadecuadas.

Con una esperanza de vida promedio de 5 a 10 veces la del acero al carbono y con un costo considerablemente inferior a los grados superiores de acero inoxidable, 3CR12 es reconocida como una alternativa muy eficaz para acero al carbono recubierto, resultando en aumentos de capital mínimo de costos y ahorros significativos en costos de mantenimiento.

Diversas exposiciones sobre el 3CR12 han mostrado excelentes propiedades en la abrasión en húmedo deslizamiento al resistir el ataque corrosivo, que mejorará el flujo y la fiabilidad. Esto permite el uso generalizado de 3CR12 en la caña de azúcar y las aplicaciones de manipulación, donde la abrasión se ve agravada por la humedad y sólidos presentes en la caña y la remolacha está siendo procesado.

Después de seleccionar los materiales para el equipo, hay que asegurarse que estos han sido fabricados con las especificaciones correctas. Las tuberías

soldadas son menos costosas que las sin costuras, pero en situaciones corrosivas hay que especificar el tratamiento térmico a que debe someterse el material después de una soldadura. Es indispensable adjuntar un peligro de condiciones detallada para cada caso.

Con el objeto de revisar si los materiales de distintos equipos e instalaciones son los correctos, es aconsejable disponer de una serie de pruebas de fácil aplicación *in situ*. Entre ellos se encuentran procedimientos químicos, chispa, mecánicos, termoeléctricos, entre otros.

Los procedimientos químicos de evaluación de materiales incluyen todas aquellas pruebas en las que se toman en consideración las posibles sustancias que podrían reaccionar con el material en cuestión y reducir su vida útil. En el caso del condensador barométrico la salinidad del ambiente podría disminuir su tiempo de vida útil si se trabaja con un material oxidable.

Los métodos mecánicos de evaluación de materiales son aquellos en los que el material es puesto a prueba bajo una serie de tensiones mecánicas, ya sea por el proceso o bien por los distintos componentes del equipo. La sección del condensador barométrico que se encuentra expuesta a mayor tensión mecánica es la pierna barométrica, ya que es esta la que soporta la mayor parte del peso del equipo. Es por ello que esta sección del condensador debe ser diseñada con un material mecánicamente resistente.

Los métodos termoeléctricos son aquellos en los que el material se ve sometido a corriente eléctrica y a temperaturas elevadas. El fin de los métodos termoeléctricos es evaluar el grado expansión que tiene el material a temperaturas evaluadas, así como su resistencia al choque térmico. Por lo que estas pruebas es aconsejable realizarla antes de la instalación del equipo; con el fin de evitar fallas durante su funcionamiento.

Basado en los procedimientos anteriormente detallados es conveniente utilizar métodos alternativos para disminuir la velocidad de corrosión del equipo. Entre estos métodos se puede mencionar el uso de recubrimientos o pinturas especiales que aíslan la superficie metálica y eviten la corrosión. Otro de los métodos con amplia difusión en la actualidad es la *protección catódica*, la cual consiste en conectar un ánodo de sacrificio conectado a la pierna barométrica, de tal manera que la pierna barométrica funcione como cátodo y ceda su materia oxidada a la pieza metálica a la que está conectada.

La protección catódica no elimina la corrosión, éste remueve la corrosión de la estructura a ser protegida y la concentra en un punto donde se descarga la corriente. Para su funcionamiento práctico requiere de un electrodo auxiliar, una fuente de corriente continua cuyo terminal positivo se conecta al electrodo auxiliar y el terminal negativo a la estructura a proteger, fluyendo la corriente desde el electrodo a través del electrólito llegando a la estructura. Influyen en los detalles de diseño y construcción parámetro de geometría y tamaño de la estructura y de los ánodos, la resistividad del medio electrólito, la fuente de corriente

3. DISEÑO METODOLÓGICO

3.1 Variables

3.1.1 Variables independientes

3.1.1.1 Variables de proceso

- Velocidad de entrada de vapor.
- Calidad del vapor.
- Temperatura de entrada del agua.
- Proporción de ingreso de no condensables.

3.1.1.2 Variables de diseño

- Presión en el condensador.
- Temperatura de salida de la mezcla.
- Velocidad de entrada de agua.

3.1.2 Variables dependientes intermedias

3.1.2.1 Variables de proceso

- Velocidad de caída del agua.
- Velocidad de salida de mezcla.
- Velocidad de salida de no condensables.

3.1.2.2 Variables de diseño

- Número de agujeros en la bandeja.
- Diámetro de agujeros periféricos.
- Diámetro de agujero central.
- Altura de la bandeja.

3.1.3 Variables finales

3.1.3.1 Variables de diseño

- Altura del cuerpo del condensador.
- Diámetro del cuerpo del condensador.
- Altura de la pierna barométrica.
- Diámetro de la pierna barométrica.
- Diámetro de las bridas.
- Potencia de la bomba.
- Coeficiente del eyector.

3.1.3.2 Variables dependientes

- Eficiencia del condensador.
- Costo estimado.

3.1.4 Descripción de las variables

Tabla I. Descripción metodológica de las variables de proceso

No.	Variable	Dimensión	Factor potencial		Factor perturbador	
			Constante	Variable	Controlable	No Controlable
1	Velocidad de entrada del vapor.	Ton/h	X		X	
2	Temperatura entrada del agua.	K		X		X
3	Proporción ingreso de no condensables.	%		X		X
4	Velocidad de entrada del agua.	Ton/h		X	X	
5	Presión en el condensador.	Btu/día		X	X	
6	Temperatura de salida de la mezcla.	K		X	X	
7	Velocidad de caída del agua.	Ft/s		X	X	
8	Velocidad de salida de mezcla.	Ton/s		X	X	
9	Velocidad de salida de no condensables.	Ton/s		X		X
10	Dimensiones.	Ft x ft x ft	X		X	

11	Potencia de la bomba.	hp		X	X	
12	Coefficiente del eyector	Adimencional		X	X	
13	Eficiencia del condensador	%		X		X
Análisis del ambiente externo						
10	Presión	Psi				X
11	Temperatura	K				X

3.2 Delimitación del área de estudio

- INDUSTRIA: azucarera.
- PROCESO: producción del azúcar.
- ETAPA DEL PROCESO: evaporación.
- EQUIPO: condensador.
- ALTERNATIVA EVALUADA: condensador barométrico.

3.3 Recursos disponibles

3.3.1 Recursos humanos

- INVESTIGADOR: Kresly Carlota Aguirre Chinchilla
- ASESOR: Ing. Qco. Orlando Posadas.
- CONSULTOR: Ing. Cristiam Aguirre.
- FUENTE: Personal de producción de ingenio y personal de INMECASA.

3.3.2 Recursos materiales

- Sistema de evaporación evaluado.
- Equipos comparativos proporcionados por INMECASA.
- Autocad 2009.
- Microsoft Excell 2009.
- Microsoft Visio 2009.

3.4. Técnica de recolección y procesamiento de datos

La recolección de información teórica es una etapa previa a la investigación en sí, pero que proporciona a los mismos fundamentos y validez. Durante esta etapa se recopiló toda la información proveniente de la literatura que puedan ayudar para el posterior tratamiento de datos e interpretación de los resultados obtenidos al final del proceso de investigación. Durante esta etapa también es de suma importancia que se realice una compilación de las ecuaciones matemáticas y ecuaciones de diseño que serán utilizadas en el desarrollo del modelo.

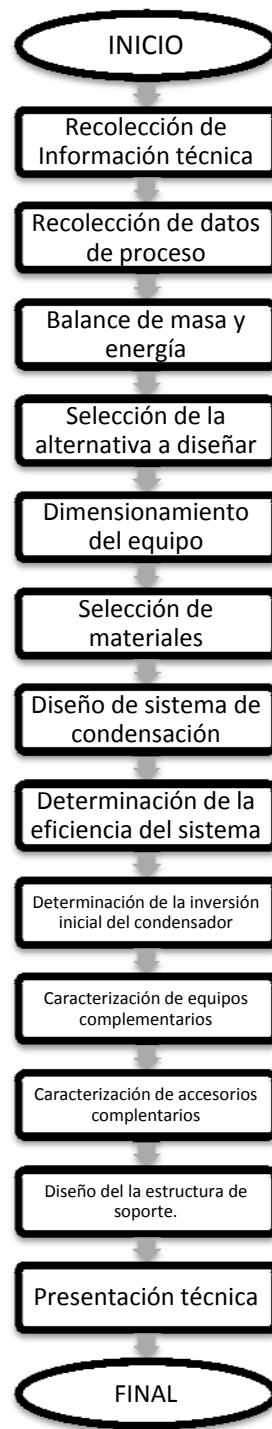
A través de la recolección teórica se recaudaron todos los datos que posteriormente fueron utilizados para poder generar adecuadamente los criterios de diseño.

3.4.1 Recolección de datos

Durante la etapa de recolección de datos se consultó personal de un ingenio, de donde se obtuvieron los datos de cuantos toneladas de caña procesan diariamente. A través de esta entrevista también se logró recopilar información adicional, como las condiciones del ambiente, eficiencias y capacidades máximas a las que se trabaja.

Otra parte fundamental en la toma de datos fue la visita a un taller especializado en la realización de equipos industriales, INMECASA. En donde se pudo obtener información sobre los materiales más utilizados, económicos y resistentes. A partir de ello se pudo determinar que el material más conveniente para el cuerpo del evaporador es el acero inoxidable 4CR12, mientras que para los accesorios puede ser utilizado acero al carbón. Así mismo se recopilaron datos sobre los accesorios del equipo, así como de costos.

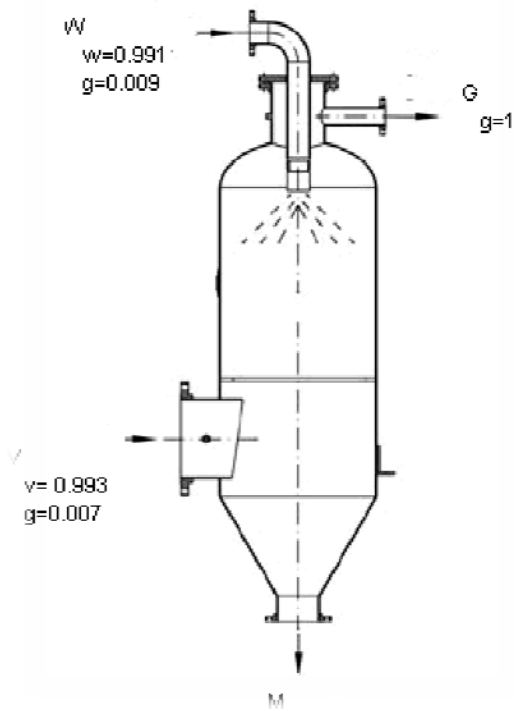
Figura 6. Diagrama de flujo del procesamiento de datos



3.5 Procesamiento y tabulación de datos

3.5.1 Balance de masa del condensador barométrico

Figura 7. Diagrama de flujo del condensador barométrico (balance de masa)



- Balance de masa general:

$$V + W = G + M$$

- Balance de masa del agua en el condensador:

$$0,993 V = x M$$

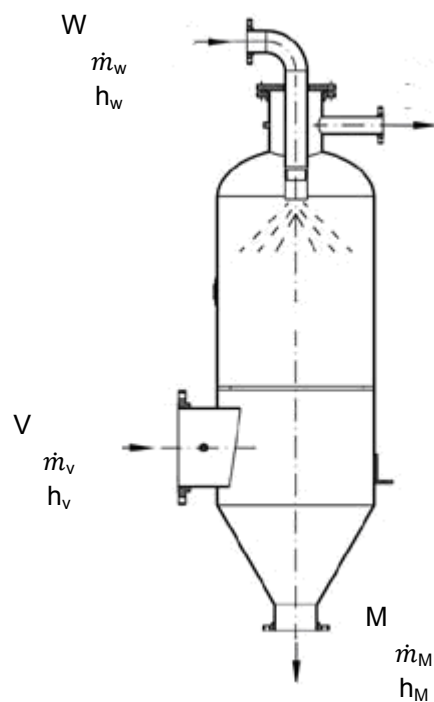
$$0,991 W = (1 - x) M$$

$$0,0070V + 0,009 W = A$$

Determinando datos a partir del balance de energía.

3.5.2 Balance de energía del condensador barométrico

Figura 8. Diagrama de flujo del condensador barométrico (balance de energía)



De la primera ley de la termodinámica; balance entálpico.

$$\sum H_{entra} = \sum H_{sale}$$

(Ecuación No. 2)

En donde:

H_{entra} = entalpías de las corrientes de entrada (Btu).

H_{sale} = entalpías en las corrientes de salida (Btu).

Entonces, despreciando la entalpía de los gases no condensables, se obtiene:

$$\dot{m}_w h_w + \dot{m}_v h_v = \dot{m}_m h_m$$

(Ecuación No. 3)

En donde:

h_m = entalpía másica de la mezcla (Btu /lb)

h_w = entalpía másica del agua (Btu /lb)

h_v = entalpía másica del vapor (Btu /lb)

\dot{m}_m = flujo másico total de la mezcla (lb/s)

\dot{m}_v = flujo másico total del vapor (lb/s)

\dot{m}_w = flujo másico total del agua (lb/s)

Planteando la mezcla como la suma del flujo másico del agua y del condensado se obtiene que:

$$\dot{m}_w h_w + \dot{m}_v h_v = \dot{m}_v h_m + \dot{m}_w h_m$$

(Ecuación No. 4)

$$\dot{m}_w (h_m - h_w) = \dot{m}_v (h_v - h_m)$$

(Ecuación No. 5)

Planteando el cambio entalpía en términos del cambio de temperatura y de la capacidad calorífica del agua.

$$\dot{m}_w c_p T_m - \dot{m}_w c_p T_w = \dot{m}_v (h_m - h_v)$$

$$\dot{m}_w c_p (T_m - T_w) = \dot{m}_v (h_m - h_v)$$

(Ecuación No. 6)

Planteando el cambio de entalpía del vapor en términos del calor latente de vaporización.

$$\dot{m}_w c_p (T_m - T_w) = \dot{m}_v \lambda$$

(Ecuación No. 7)

En esta ecuación se puede fijar 0 °C como la temperatura de referencia para la entalpía y asumiendo la capacidad calorífica como constante. Despejando el flujo másico del agua y convirtiéndolo a toneladas sobre hora:

$$\dot{m}_w = \frac{\dot{m}_v \lambda}{500(T_v + T_w - T_m)}$$

(Ecuación No. 8)

En donde:

\dot{m}_v = flujo másico del vapor (ton/h)

\dot{m}_w = flujo másico del agua (ton/h)

T_v = temperatura del vapor de alimentación (F)

T_w = temperatura del agua de refrigeración (F)

T_M = temperatura de la mezcla (F)

c_p = capacidad calorífica (Btu/lbF)

λ = calor latente de vaporización del agua (Btu/lbF)

Utilizando los datos del inciso 3.5.1 y datos de propiedades del vapor saturado (Cheng, pág. 215, Tabla A-1) y sustituyendo en la ecuación anterior se obtiene:

$$\dot{m}_w = \frac{(5,91 \text{ Btu/lbF})(200,3 \text{ ton/h})(19^\circ \text{ F})}{500(250,5^\circ \text{ F} + 78,8^\circ \text{ F} + 241,50^\circ \text{ F})}$$
$$\dot{m}_w = 1\,171,9 \text{ tn/h}$$

Sustituyendo los datos encontrados en el balance general y los elementales de masa se pueden obtener los flujos restantes:

- Balance de masa del agua en el condensador:

$$0,0070 (200,3 \text{ ton/h}) + 0,009(1\,171,9 \text{ ton/h}) = A$$

$$A = 11,94 \text{ ton/h}$$

- Balance de masa general:

$$200,3\text{ton/h} + 1171,9\text{ton/h} = 11,94\text{ton/h} + M$$

$$M = 1\,360,26\text{ ton/h}$$

Tabla II. Resumen flujos en el condensador

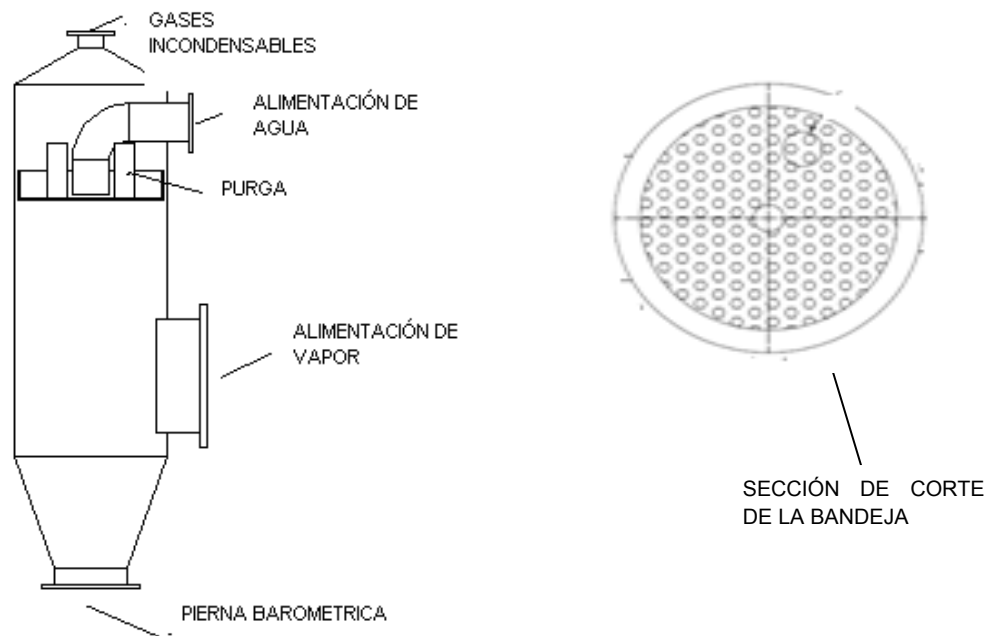
NOMBRE	FLUJO VOLUMÉTRICO (ton/h)
Vapor entrante	200,3
Agua al condensador	1 171,9
Gases no condensables	11,94
Mezcla agua-condensado	1 360,26

FUENTE: Balance de masa y energía 3.5.1 y 3.5.2

3.5.3 Dimensionamiento

Para poder determinar las dimensiones adecuadas para el cuerpo del condensador barométrico, se utilizarán las deducciones planteadas en *Hugot* (Ref. No. 8) para un condensador de contacto directo de bandeja perforada sencilla, debido a que según Hugot, Cheng y Graham Corporation es el que representa una eficiencia hasta del 5% superior a la de otros condensadores barométricos y reducción de costos. Este condensador combina la eficiencia de un condensador *sprayer* con la simplicidad mecánica de un condensador de bandejas. A continuación se presenta el esquema de un condensador de bandeja sencilla tipo lluvia a contracorriente:

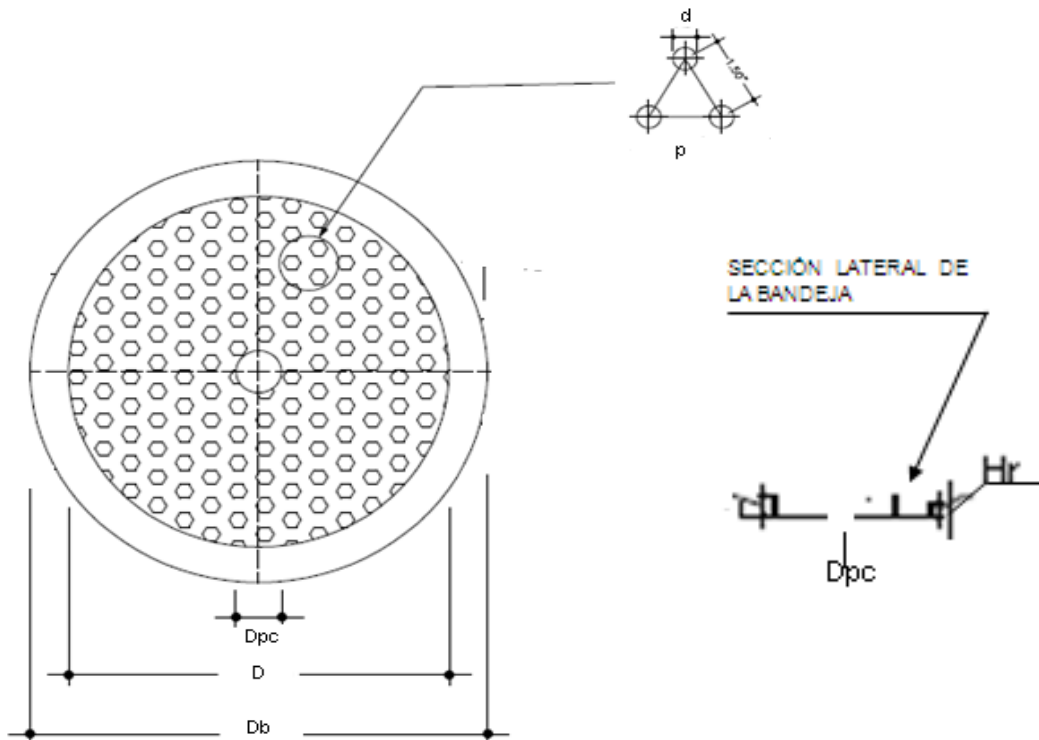
Figura 9. Condensador barométrico de bandeja sencilla a contracorriente



3.5.3.1 Diseño del cuerpo del condensador

3.5.3.1.1 Bandeja perforada

Figura 10. Diseño de la bandeja perforada



Hugot (Ref. No. 8) propone la siguiente ecuación de diseño para el cálculo del flujo del agua, a través de los agujeros circunferenciales.

$$Q_p = \frac{\pi}{4} * d^2 * C_D \sqrt{(2gh)}$$

(Ecuación No. 9)

En donde:

Q_p = flujo volumétrico a través de cada orificio (ft^3/seg)

d = diámetro de orificio (ft)

h = altura del líquido sobre la bandeja (ft)

g = aceleración por gravedad (ft/s^2)

C_D = coeficiente de descarga (Sugerido por Hugo como 0,65)

Según Hugot (Ref. No. 8) como criterio de diseño se pueden utilizar un diámetro de orificio de 0,42 pies y una cabeza de altura de 0,166 pies. Sustituyendo datos se obtiene que el caudal que fluye por cada orificio es de:

$$Q_p = \frac{\pi}{4} \cdot (0,426\text{ft})^2 \cdot (0,65) \sqrt{2 \left(32,2 \frac{\text{ft}}{\text{s}^2} \right) (0,166\text{ft})}$$

$$Q_p = 0,003031 \text{ ft}^3/\text{s}$$

El 10% del agua entrante debe dejar la bandeja por los orificios circunferenciales, y otro 10% debe desbordar.

$$N = 0,80 \cdot Q_c / Q_p$$

(Ecuación No. 10)

En donde:

N = número de perforaciones en la bandeja.

Q_p = flujo volumétrico que fluye por cada orificio (ft^3/s)

Q_w = flujo volumétrico de agua que entra al condensador (ft^3/s)

Sustituyendo el flujo de agua encontrado mediante el balance de masa y energía en la secciones 3.5.1 y 3.5.2 se obtiene que:

$$N = \frac{0,80 \cdot (1171,9 \text{tn/h})}{((0,003031 \text{ft}^3/\text{s} \cdot 62,3 \text{lb}/\text{ft}^3) / 2000 \text{lb}/\text{ton}) \cdot 3600 \text{s/h}}$$

$$N = 114,13$$

Entonces, se determina que el número de agujeros circunferenciales es de 114.

Ahora, para determinar el diámetro de la bandeja se utiliza:

$$A_a = \frac{\pi}{(2\sqrt{3})} \cdot \frac{d^2}{p^2}$$

(Ecuación No. 11)

$$A_a \cdot A_b = N \cdot A_o$$

(Ecuación No. 12)

$$\frac{\pi}{(2 \cdot \sqrt{3})} \cdot \frac{d_2^2}{p^2} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot D_2^2 = N \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d_2^2$$

(Ecuación No. 13)

De donde se obtiene:

$$D = (N \cdot 2 \cdot \sqrt{3} / \pi)^{0,5} \cdot p$$

(Ecuación No. 14)

En donde:

A_a = área abierta por unidad (ft^2)

d = diámetro de agujero (ft)

A_b = área de bandeja (ft^2)

A_o = área del orificio (ft^2)

N = número de orificios circunferenciales

p = pitch del plato perforado (Hugot (Ref. No. 8) sugiere 0,124ft como criterio de diseño)

D = diámetro de la bandeja (ft)

Sustituyendo datos en la ecuación No. 15 se obtiene que:

$$D = (114 * 2 * \sqrt{3}/\pi)^{0.5} * (0,124ft)$$

$$D = 4,50ft$$

A lo que debe añadirse el área no perforada debajo de la entrada de agua, las cuales no son tomadas en cuenta en los cálculos anteriores. Esta área corresponde al 20% del total de la bandeja, por lo que se obtiene:

$$D = 4,50 ft (1,2)$$

$$D = 5,40 ft.$$

Para calcular el diámetro del agujero circunferencial a la entrada de la bandeja se utiliza:

$$A_b = \pi/4D^2$$

$$A_b = 22,06ft^2$$

$$A_{pc} = 0,10A_b$$

(Ecuación No. 15)

Entonces, se obtiene que:

$$A_{pc} = 2,206 \text{ft}^2$$
$$D_{pc} = \sqrt{2,206 \text{ft}^2 * 4 / \pi}$$

(Ecuación No. 16)

$$D_{pc} = 0,0653 \text{ft}$$

En donde:

A_{pc} = área de la perforación circunferencial (ft^2)

D_{pc} = diámetro de la perforación circunferencial (ft^2)

Finalmente, para determinar la altura de rebosadero de la bandeja Hugot sugiere que debe ser la décima parte del diámetro de bandeja, a la cual debe ser restado el 20% del diámetro por el que no circula agua en la bandeja. Con lo cual se obtiene:

$$H_R = 0,8 (D / 10)$$

(Ecuación No. 17)

En donde:

H_R = altura de rebosadero de bandeja (ft)

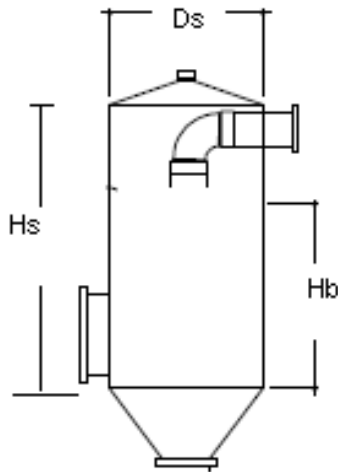
D = diámetro de bandeja (ft)

De donde se obtiene:

$$H_R = 0,3936 \text{ft.}$$

3.5.3.1.2 Cuerpo del condensador

Figura 11. Diseño del cuerpo del condensador



El diámetro interno del condensador debe ser tal que permita que el 10% de agua que desborda de la bandeja fluya adecuadamente, más un factor de seguridad del 15% recomendado por Hugot. Del inciso anterior se conoce que el área por el que fluye el 10% es de 2,206 ft²; lo cual corresponde al área de flujo por perforación. Entonces se puede encontrar el diámetro de la coraza de la siguiente manera:

$$A_s = (A_b + 0,0653 \text{ ft}^2) / 1,15$$

(Ecuación No. 18)

$$A_s = (22,06 \text{ ft}^2 + 2,206 \text{ ft}^2) / 1,15$$

$$A_s = 27,9059 \text{ ft}^2$$

Finalmente, para encontrar el diámetro:

$$D_s = \sqrt{27,90259 \text{ ft}^2 * 4 / \pi}$$

(Ecuación No. 19)

$$D_s = 6,54 \text{ ft}$$

En donde:

A_s = área de la coraza (ft^2)

A_b = área de la bandeja (ft^2)

D_s = diámetro de coraza (ft)

Según Chen (Ref. No. 3), como criterio de diseño se puede determinar la altura de la coraza como:

$$H_s = 2D_s - 1$$

(Ecuación No. 20)

$$H_s = 2(6,54 \text{ ft}) - 1$$

$$H_s = 12,08 \text{ ft}$$

Para encontrar la altura de la bandeja se utiliza:

$$H_b = 2/3 H_s$$

(Ecuación No. 21)

En donde:

H_b = altura de la bandeja (ft)

H_s = altura de la coraza (ft)

Entonces:

$$H_b = 2/3 (12,08 \text{ ft})$$

$$H_b = 7,95 \text{ ft}$$

De esta manera, se puede aproximar la altura de la bandeja a 8 pies sobre el nivel de entrada del vapor al condensador.

3.5.3.1.3 Diseño de boquillas

Para la dimensión de las boquillas se utiliza las velocidades recomendadas de diseño (Ref. No. 1. Tabla 8.1 “Velocidades de fluidos en tuberías”, pág. 190).

$$Q = A \cdot v$$

(Ecuación No. 22)

En donde:

Q = caudal volumétrico (ft³/s)

A = área de flujo (ft²)

v = velocidad lineal del fluido (ft/s)

- Para la boquilla de entrada de vapor:

$$(200,3 \text{ tn/h} \cdot 2000 \text{ lb/tn}) / (13,18 \text{ lb/ft}^3 \cdot 3600 \text{ s/h}) = A \cdot 60 \text{ m/s} \cdot 3,280 \text{ 6ft/m}$$

$$A = 129,447 \text{ ft}^2$$

$$D = \sqrt{129,447 \text{ ft}^2 \cdot 4 / \pi}$$

$$D = 3,93 \text{ ft}$$

- Para la boquilla de entrada de agua:

$$(1\,171,9 \text{ ton/h} * 2\,000 \text{ lb/ton}) / (32,2 \text{ lb/ft}^3 * 3\,600 \text{ s/h}) = A * 2 \text{ m/s} * 3,2806 \text{ ft/m}$$

$$A = 28,9917 \text{ ft}^2$$

$$D = \sqrt{28,9917 \text{ ft}^2 * 4 / \pi}$$

$$D = 1,91 \text{ ft}$$

- Para la boquilla de salida de gases no condensables:

$$(11,94 \text{ ton/h} * 2\,000 \text{ lb/ton}) / (9,41 \text{ lb/ft}^3 * 3\,600 \text{ s/h}) = A * 15 \text{ m/s} * 3,2806 \text{ ft/m}$$

$$A = 0,1432 \text{ ft}^2$$

$$D = \sqrt{0,1432 \text{ ft}^2 * 4 / \pi}$$

$$D = 0,6519 \text{ ft}$$

3.5.3.2 Diseño de la pierna barométrica

3.5.3.2.1 Diámetro de la pierna barométrica

Según Hugot (Referencia 8) la velocidad recomendada para el flujo de la mezcla corresponde a 0,98 ft/s. Esta velocidad permite que la presión hidrostática en la parte superior de la pierna se mantenga. Se utiliza el mismo método de las velocidades recomendadas de diseño que se utilizó en el inciso anterior, de la siguiente manera.

De la ecuación No. 17:

$$Q = A \cdot v$$

Sustituyendo datos y despejando:

$$(1\,360,26 \text{ ton/h} * 2\,000 \text{ lb/ton}) / (25,75 \text{ lb/ft}^3 * 3600 \text{ s/h}) = A * 0,98 \text{ ft/s}$$

$$A = 3,2851 \text{ ft}^2$$

$$D = \sqrt{3,285 \text{ ft}^2 * 4 / \pi}$$

$$D = 2,35 \text{ ft}$$

De manera que el diámetro de la pierna barométrica puede ser aproximado a 2 pies.

3.5.3.2.2 Altura de la pierna barométrica

Para calcular la altura de la pierna se utiliza un balance de energía entre la parte superior y la parte inferior de la pierna barométrica.

$$(P_1/\rho + Z_1 g/g_c + V_1^2/2g_c) \dot{m}_1 = (P_2/\rho + Z_2 g/g_c + V_2^2/2g_c) \dot{m}_2$$

(Ecuación No. 23)

En donde:

\dot{m}_1 =flujo másico de la mezcla en la parte superior (lb/s)

\dot{m}_2 =flujo másico de la mezcla en la parte inferior (lb/s)

V_1 = velocidad de la mezcla en la parte superior (ft/s)

V_2 = velocidad de la mezcla en la parte inferior (ft/s)

g_c = compatibilizador (lbF/lbm)

g = aceleración por gravedad (ft/s²)

Z_1 = altura superior de la pierna (ft)

Z_2 = altura inferior de la pierna (ft)

P_1 = presión en la parte superior de la pierna (psi)

P_2 = presión en la parte inferior de la pierna (psi)

ρ = densidad (lb/ft³)

Eliminando aquellas energías y términos que son despreciables se obtiene:

$$P_1/\rho + Z_1 g/g_c = P_2/\rho + Z_2 g/g_c$$

(Ecuación No. 24)

Agrupando términos:

$$(Z_1 - Z_2) g/g_c = (P_1 - P_2) / \rho$$

(Ecuación No. 25)

Finalmente, se obtiene:

$$H_{Bp} = \frac{\Delta P g_c}{\rho g}$$

(Ecuación No. 26)

En donde:

H_{Bp} =altura bruta de la pierna barométrica (ft)

ΔP = diferencia de presión entre la presión atmosférica y la presión del condensador (psia)

g_c = compatibilizador de unidades de medición.

ρ = densidad del fluido (lb/ft³)

g = aceleración de la gravedad (ft/s²)

Lo cual permite obtener una altura de pierna de:

$$H_{Bp} = \frac{((20-2) \text{ psia})(32,174 \text{ lbF/lbm})}{(32,2 \text{ ft/s}^2)(25,5 \text{ lb/ft}^3)}$$
$$H_{Bp} = 33,85 \text{ ft}$$

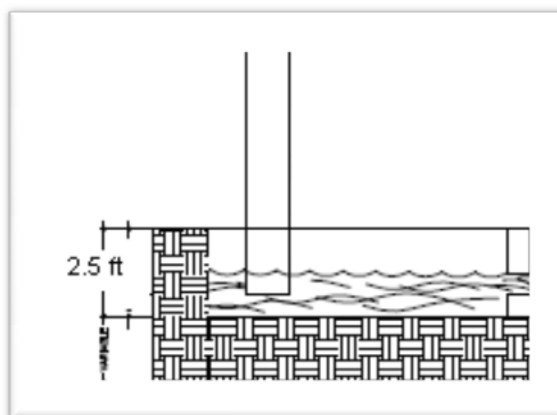
A la altura de la pierna es recomendable agregar 2 pies, aquellos que irán sumergidos por debajo del nivel del pozo de descarga, lo cual servirá como soporte del equipo. Es importante además, añadir 0,5 pies bajo el nivel del agua, para evitar que el condensador pueda absorber aire a un nivel bajo de agua. Entonces, la altura neta de la pierna es:

$$H_{Np} = 34 \text{ ft} + 2 \text{ ft} + 0,5 \text{ ft.}$$
$$H_{Np} = 36,5 \text{ ft}$$

En donde:

H_{Np} =altura neta de la pierna barométrica (ft)

Figura 12. Diseño de la pierna barométrica



3.5.4 Determinación de la eficiencia teórica del equipo

Según Gaffaret (Referencia 6) la eficiencia para un condensador barométrico está dada por:

$$\eta = \frac{\dot{m}_v * h_v}{\dot{m}_w * h_w}$$

(Ecuación No. 27)

En donde:

η = eficiencia del condensador (100%)

\dot{m}_w = flujo másico del agua de enfriamiento (lb/h)

\dot{m}_v = flujo másico del vapor al condensador (lb/h)

h_v = entalpía del vapor (btu*/lb)

h_w = entalpía del agua (btu/lb)

Sustituyendo datos se obtiene:

$$\eta = \frac{1\,127,77 \text{ lb/h} * 250,53 \text{ btu/lb}}{5\,955 \text{ ton/h} * 55,18 \text{ btu/lb}} * 100$$

$$\eta = 85,98\%$$

3.5.5 Determinación de los materiales

3.5.5.1 Cuerpo del condensador

En el cuerpo del condensador se manejan temperaturas moderadas y presiones de vacío. Es importante mencionar que el vapor y el condensado son de alta pureza y por lo general no producen corrosión. Sin embargo, el agua que ingresa al condensador es agua sin previo tratamiento; por lo que esta sí puede ser un foco importante de corrosión e incrustaciones dentro del equipo.

Es importante también tomar en cuenta las condiciones del lugar en el que el equipo estará en operación. En este caso, el clima es caluroso, húmedo y con gran contenido de salinidad. Por esta razón se prefiere no utilizar acero al carbón; en su lugar se recomienda utilizar el acero *3CR12*, una aleación con alto contenido de Ni, Mn, S y N. Al presentar una alta resistencia a la corrosión, pero a un bajo precio en comparación con otros aceros inoxidable. También debe mencionarse que el acero *3CR12* posee un coeficiente de dilatación térmica de $10,8 \mu\text{m}/^\circ\text{C}$ y una conductividad térmica de $30,5 \text{ W/mK}$ a una temperatura de $50 \text{ }^\circ\text{C}$, por lo que permite trabajar a las condiciones previamente establecidas.

Para mantener el vacío y demás condiciones de trabajo, se utilizarán láminas con un grosor de 1/4 pulgada. También es necesario el uso de una soldadura de GTAW con argón con 1.5% de oxígeno.

3.5.5.2 Bandeja

La bandeja opera a las mismas condiciones planteadas para el cuerpo del condensador, es decir, que la bandeja está expuesta a la misma presión, temperatura y a los mismos fluidos. Sin embargo, la bandeja se encuentra más directamente expuesta al agua de enfriamiento, la cual como se dijo anteriormente no lleva tratamiento previo alguno. En la misma línea, la bandeja tiene un mayor contacto con los gases no condensables, los cuales también pueden tener un impacto significativo en la corrosión del equipo.

Por otro lado, la bandeja no se encuentra expuesta a situaciones ambientales, a diferencia de la carcasa del condensador; por lo que en general deben tomarse consideraciones distintas para elegir el material del que se fabricará la bandeja del equipo.

Por estas condiciones la bandeja será construida de lámina de acero 304L. Este posee baja dilatación y conductividad térmica, al igual que el 3CR12, pero no soporta altas concentraciones salinas a diferencia de este. El acero 3CR12 se caracteriza por tener concentraciones considerables de molibdeno en su composición, lo cual le da brinda una buena resistencia a la corrosión.

La soldadura de del acero 304L se realiza por medio de acero. El espesor de la bandeja debe de ser de ½ pulgada, lo cual incluye la ceja de desbordamiento que rodea a la bandeja.

3.5.5.3 Pierna barométrica

La pierna barométrica funciona a presiones de vacío y a una temperatura de aproximadamente 40 °C. Trabaja con un fluido de alta pureza, ya que la mayor parte de su contenido proviene del vapor condensado. Es por ello que se trabaja con acero al carbón. Este acero contiene más de 0,5% de carbono en su composición, por lo que no ofrece una alta resistencia a la corrosión; aunque con pintura anticorrosiva y con el debido mantenimiento puede aumentar considerablemente su vida útil. Por otro lado, el acero al carbono presenta precios considerablemente menores a los del acero inoxidable; por lo que disminuye la inversión inicial.

El grosor de la lámina a utilizar es de 1/4 pulgada, pues debido a las presiones que se manejarán es importante contar con una tubería que soporte el vacío generado en el equipo.

Para prolongar la vida útil de la pierna barométrica, y del equipo en general, debe conectarse en serie con ánodos de sacrificio como protección catódica. Este procedimiento es especialmente importante para la pierna barométrica ya que a esta no se le puede dar mantenimiento preventivo por el lado interior después de su instalación. Debido a que el suelo para el cual se diseña el equipo posee un alto contenido de salinidad, este podrá ser utilizado como medio salino.

El metal seleccionado para fungir como ánodo de sacrificio es el magnesio. Los ánodos de magnesio tienen un alto potencial con respecto al hierro y están libres de pasivación. Están diseñados para obtener el máximo rendimiento posible, en su función de protección catódica. Se utilizan en estructuras metálicas enterradas en suelo de baja resistividad hasta 3000 ohmio-cm.

Para determinar el tamaño de los ánodos de sacrificio debe tomarse en cuenta la masa que estos deberán recibir del cátodo, por lo que es necesario determinar la masa que está a expensas de oxidación durante la vida útil esperada del equipo. Determinando la masa acero al carbono presente en el equipo:

$$\text{Volumen} = 120 \text{ ft}^2 * 0,04166 \text{ ft} = 4,992 \text{ ft}^3$$

$$\text{Peso (kg)} = \frac{4,99 \text{ ft}^3}{3,28} * \frac{785 \text{ kg}}{\text{m}^3} = 1 196,50 \text{ kg}$$

Con lo que se puede estimar que un 30% de la masa del condensador se puede oxidar a las condiciones planteadas, se tiene una masa de 358,95 kg de acero oxidado. Por lo que para que dicho retirar esa masa de óxido con el ánodo de sacrificio necesitamos:

$$358,95 \text{ kg} * \frac{\text{m}^3}{655 \text{ kg}} = 0,54 \text{ m}^3 = 4,53 \text{ ft}^3$$

Dichos 4,53 ft³ pueden ser distribuidos en dos ánodos de sacrificio de 2,26 ft³ para distribuir el flujo de corriente de una manera adecuada.

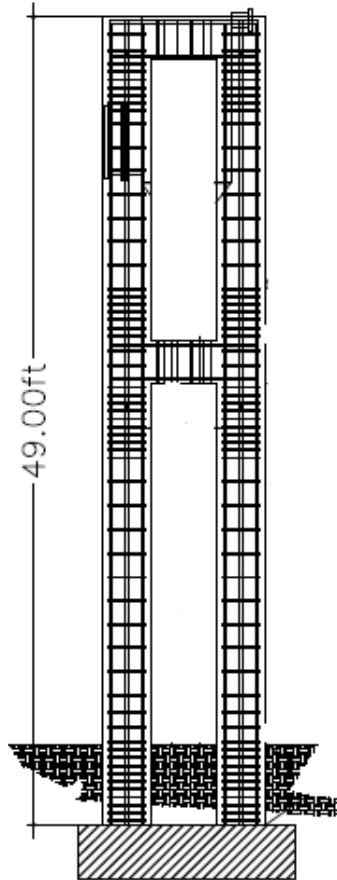
3.5.5.4. Soporte del condensador

La pierna barométrica por sí sola no puede sostener el cuerpo de condensador debido a sus dimensiones. Es necesario añadirle al equipo soporte adicional. Por ello al diseño deben añadirse cuatro soportes, dos de cada lado, lo que le brindará mayor estabilidad al equipo. La posición de los soportes debe formar un ángulo de 45° con respecto a las entradas de agua de enfriamiento y de vapor; formando un ángulo de 180° entre ellos. Esto permite que el peso del cuerpo del condensador se distribuya uniformemente entre los cuatro soportes. La altura a colocar los soportes es en la parte superior del cuerpo del condensador.

Para determinar el material de los soportes, debe tomarse en cuenta factores de costo beneficio. Esto se debe a que se desea construir un equipo más seguro que evite cualquier problema con los trabajadores, por lo que no se debe buscar el material más económico sino aquel que satisfaga los requerimientos de soporte y durabilidad. En este caso se ha seleccionado el acero 3CR12 de $\frac{1}{2}$ pulgada de espesor para construir los soportes, lo cual permite asegurar la estabilidad del equipo por un mayor tiempo con bajos costos de mantenimiento.

Los soportes del cuerpo del condensador deben descansar con apoyos que soporten el peso del equipo. En este caso se ha contemplado la construcción de columnas de concreto reforzado. Se ha seleccionado este material debido a que requiere menores costos iniciales y de mantenimiento. El peso del equipo deberá ir distribuido en cuatro columnas, dos de cada lado. Las dos columnas del mismo lado deberán ir conectadas por una viga formando un arco sobre el cual reposarán los soportes.

Figura 13. Diseño del soporte del condensador barométrico



La altura de los estructura debe ser de 49 pies para que quede justo por debajo de los soportes. Las columnas fueron diseñadas de 1,5 pies por lado y la separación entre ellas debe ser de 6 pies. La zapata sobre la que descansa la estructura debe ser en dos sentidos con refuerzo por temperatura. Estas consideraciones fueron tomadas para asegurar que la estructura soporte el peso del equipo. Además, al armando de acero en el concreto se deben agregar escaleras de acero al carbón en las columnas, lo cual deberá permitir mayor accesibilidad al equipo.

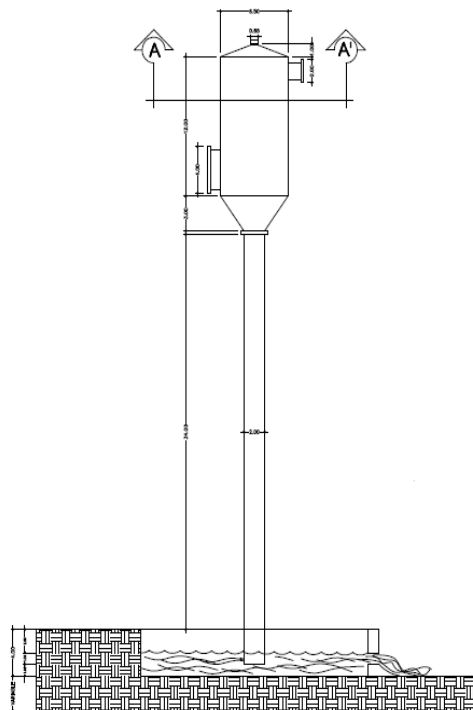
4. RESULTADOS

4.1 Dimensionamiento del condensador barométrico

Tabla III. Diseño del condensador barométrico

DATOS DE PROCESO			
	Vapor al condensador	Agua de enfriamiento	Mezcla en la pierna
Flujo másico (ton/h)	200,3	1171,9	1360,26
Temperatura (F)	72,1	58,0	67,5
Presión (Psi)	7,50		
DATOS DE DISEÑO			
CUERPO DEL CONDENSADOR			
Diámetro	6,5 ft		
Altura	12 ft		
Espesor	¼ pulg		

BANDEJA	
Diámetro de bodega	5,40 ft
Altura de bodega	0,40 ft
Diámetro del orificio central	0,65 ft
Diámetro de agujeros circundantes	0,020 ft
Agujeros circundantes	114
Pitch	0,12 ft
Altura de la bodega	8 ft
Espesor	½ pulgada
PIERNA BAROMÉTRICA	
Altura bruta	34 ft
Diámetro	2,5 ft
Altura neta	36,5 ft
Espesor	¼ pulg
MATERIALES	
Cuerpo	4CR12
Bandeja	304LSS
Pierna barométrica	Acero al carbón
Bridas y accesorios	4CR12



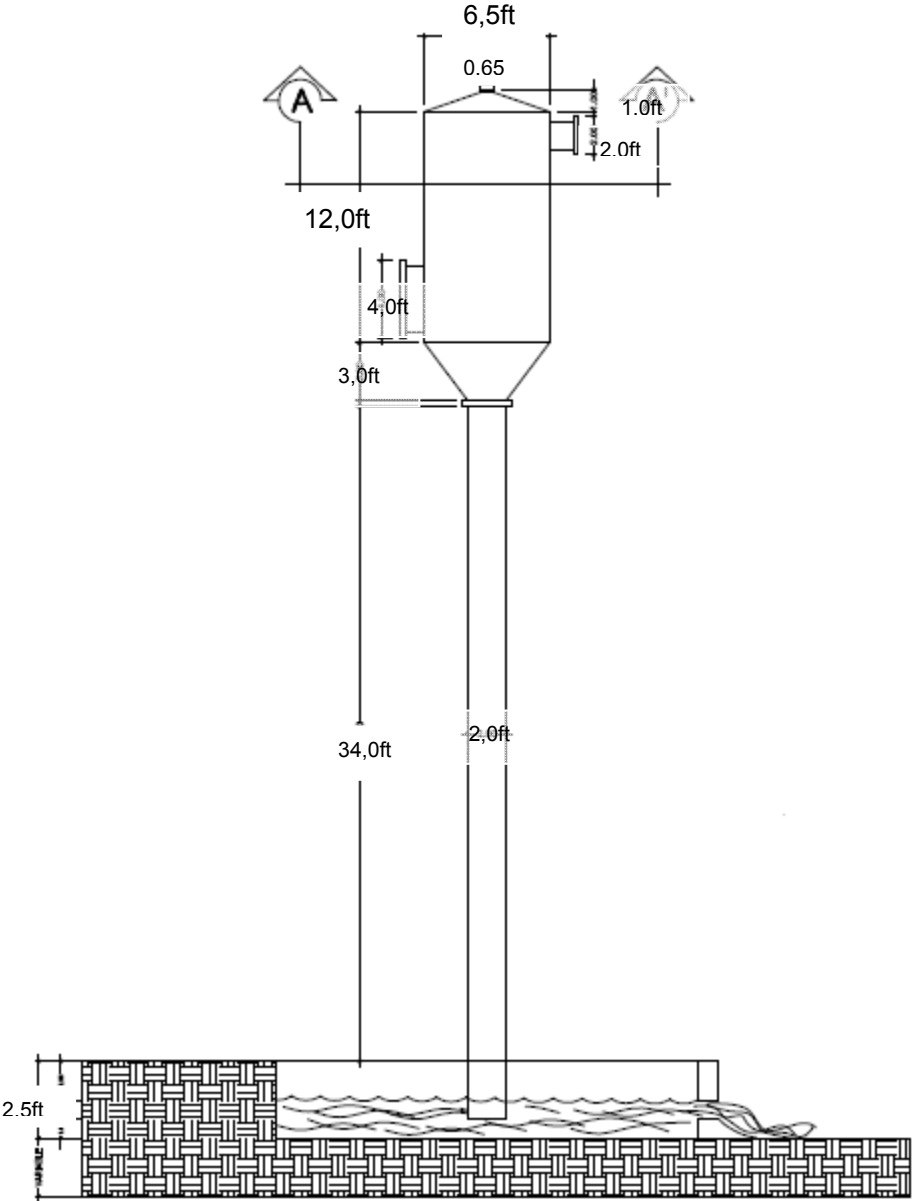
DIÁMETROS NOMINALES DE BOQUILLAS			
Entrada de vapor	4,00 ft	<p>The diagram shows a cross-section of a nozzle assembly. It features a central cylindrical chamber with a diameter labeled N1. A smaller diameter section on the right has a diameter labeled N2. A vertical dimension U1 is shown on the left side. A horizontal dimension C2 is shown at the top left. A small gap or feature on the right is labeled R. The assembly is shown with hatching to indicate different materials or sections.</p>	
Salida de gases inconfensables	0,65 ft		
Entrada de agua de condensación	2,0 ft		
Salida de mezcla	2,05 ft		
Especificación de bridas	BS4504 PN6		
CARACTERIZACIÓN DE EQUIPO COMPLEMENTARIO			
Eyector de gases incondensbles	6,0 hp	Eyector de gases incondensbles	0,015

FUENTE: Inciso 3.5 (págs39-55), Apéndices 2 y 4.

4.2 Esquema del equipo

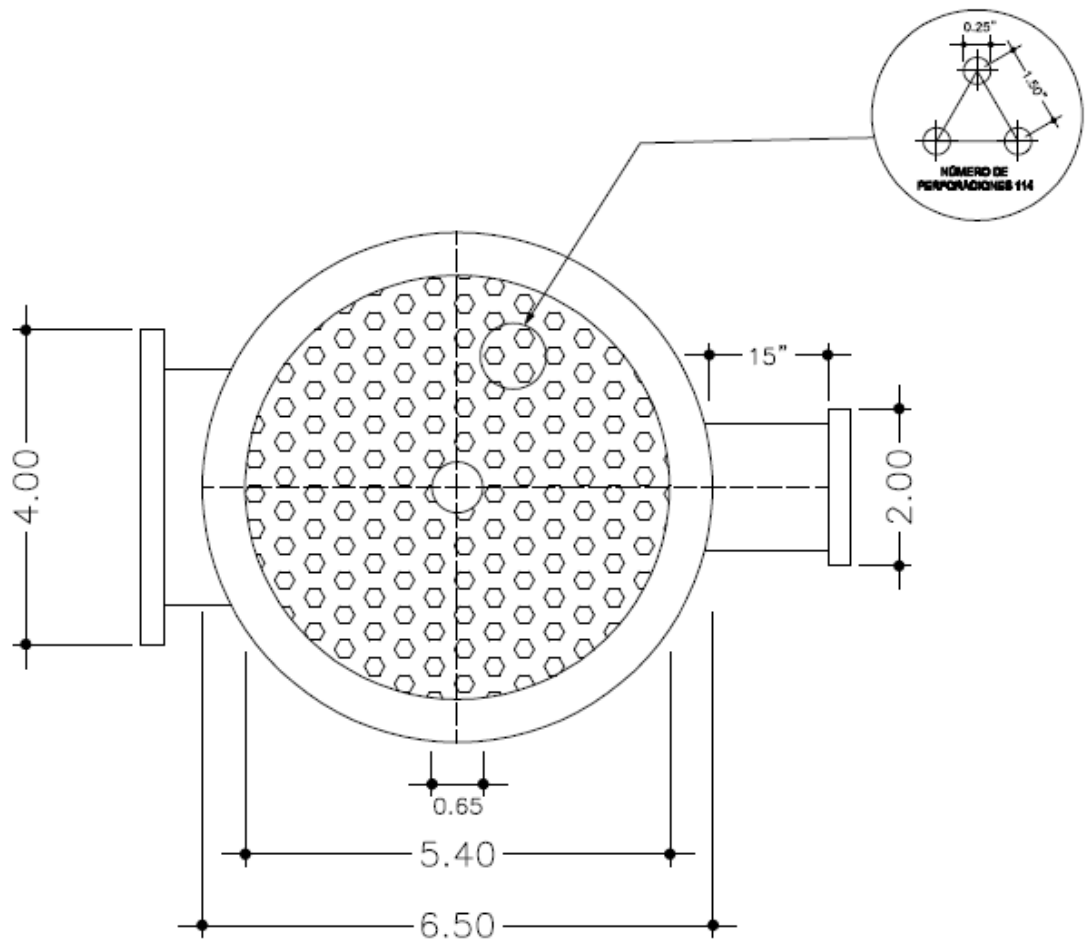
4.2.1 Vista frontal del condensador barométrico

Figura 14. Vista frontal del condensador



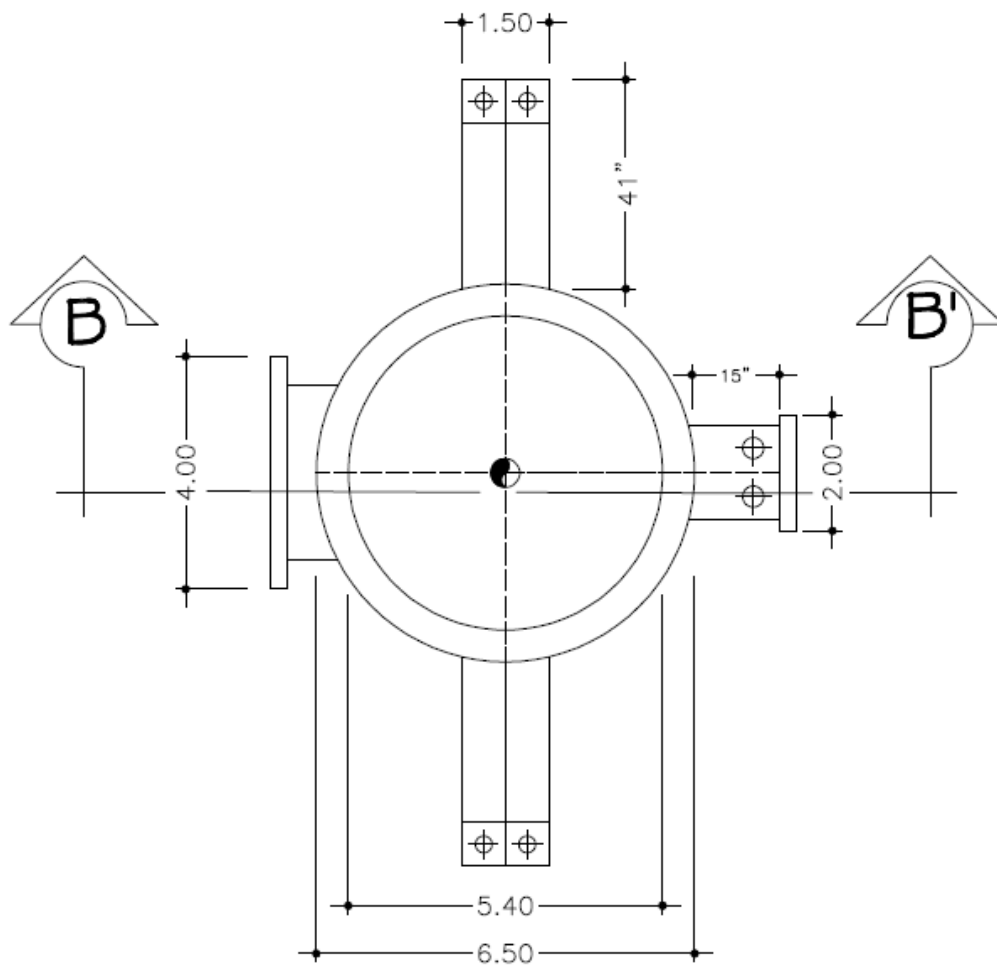
4.2.2 Corte transversal de la vista frontal del condensador barométrico

Figura 15. Corte transversal de vista frontal del condensador barométrico



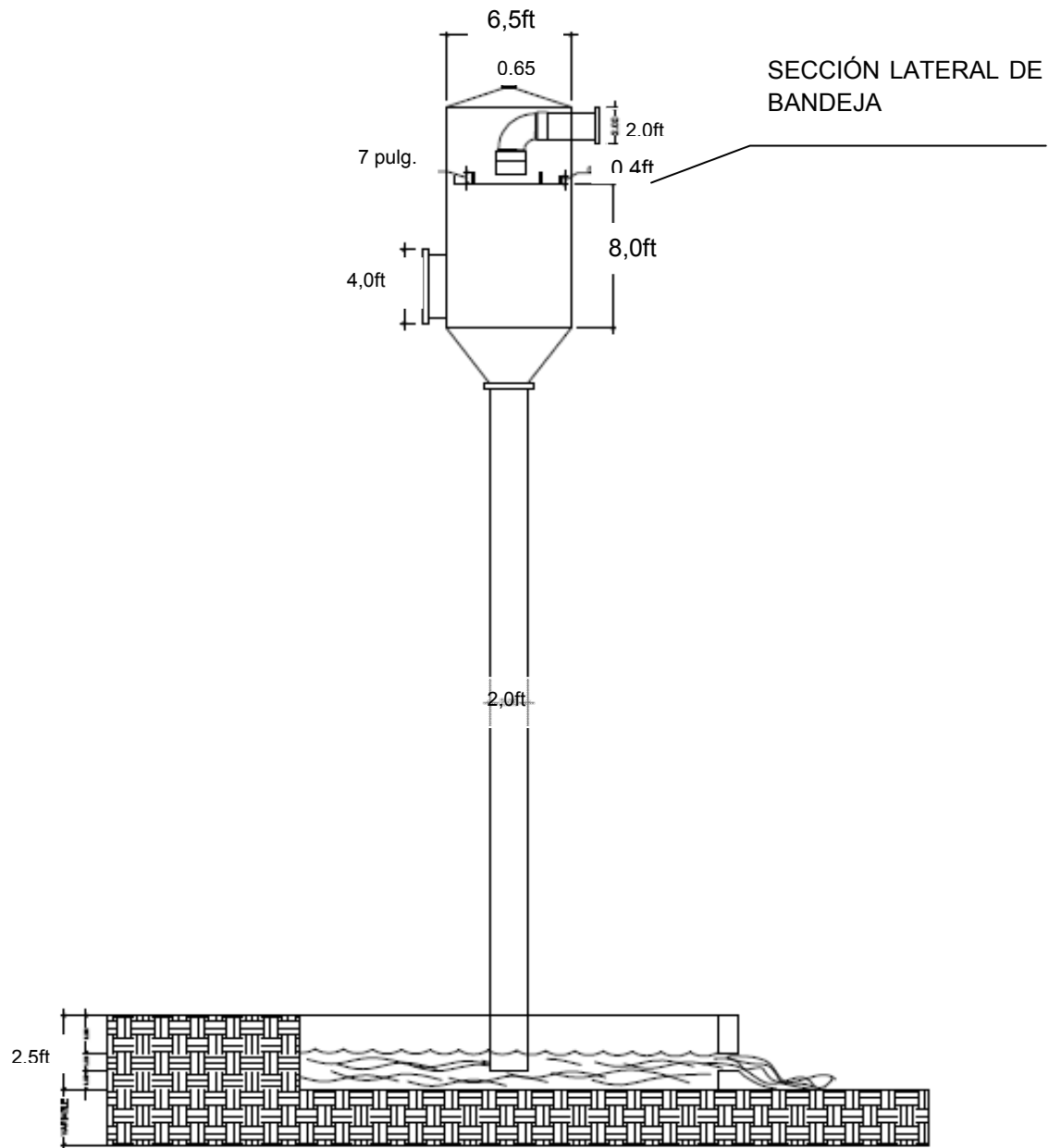
4.2.3 Vista de planta del condensador

Figura 16. Vista de planta del condensador



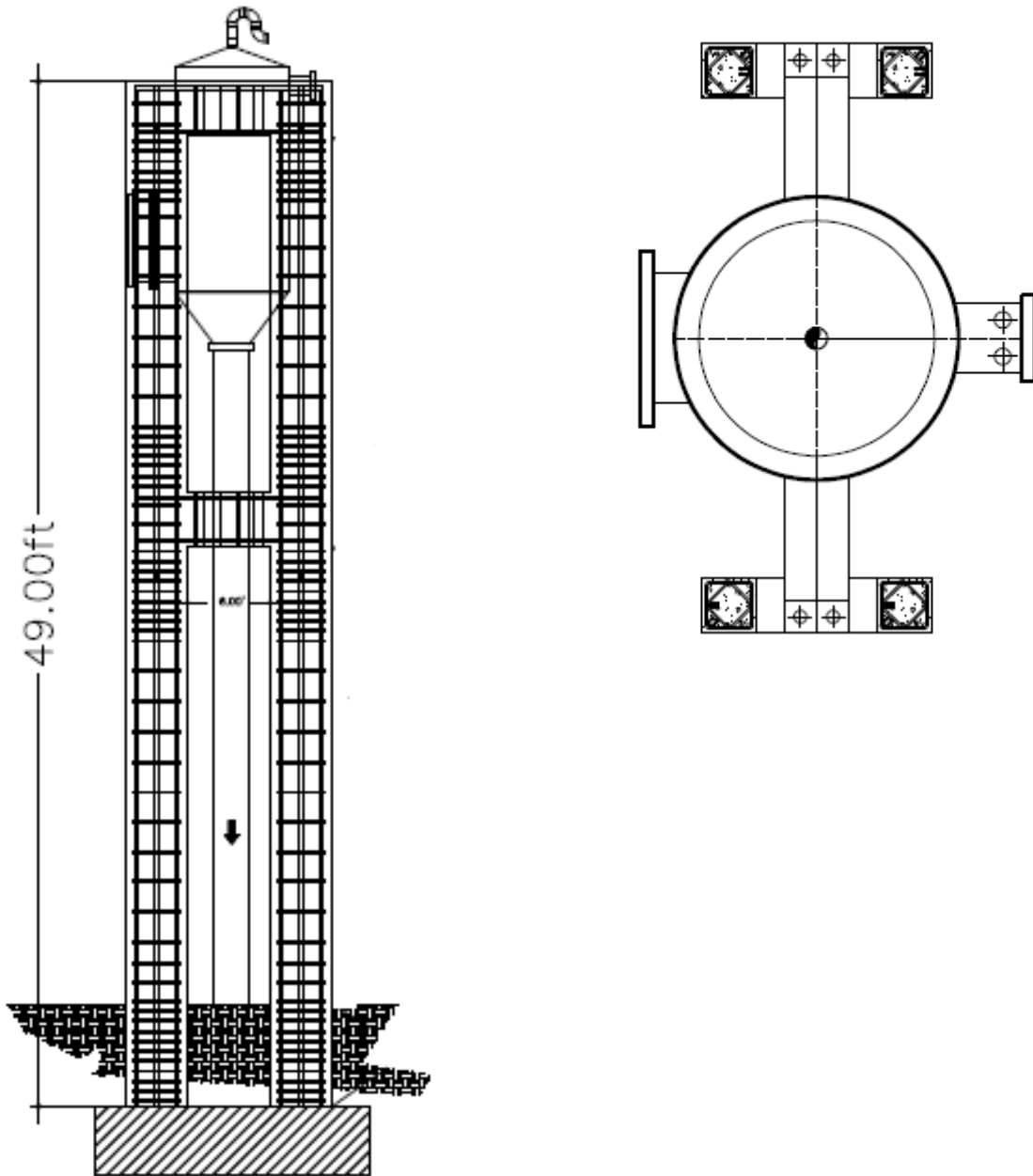
4.2.4 Corte transversal de vista de planta del condensador

Figura 17. Corte transversal de la vista de planta del condensador



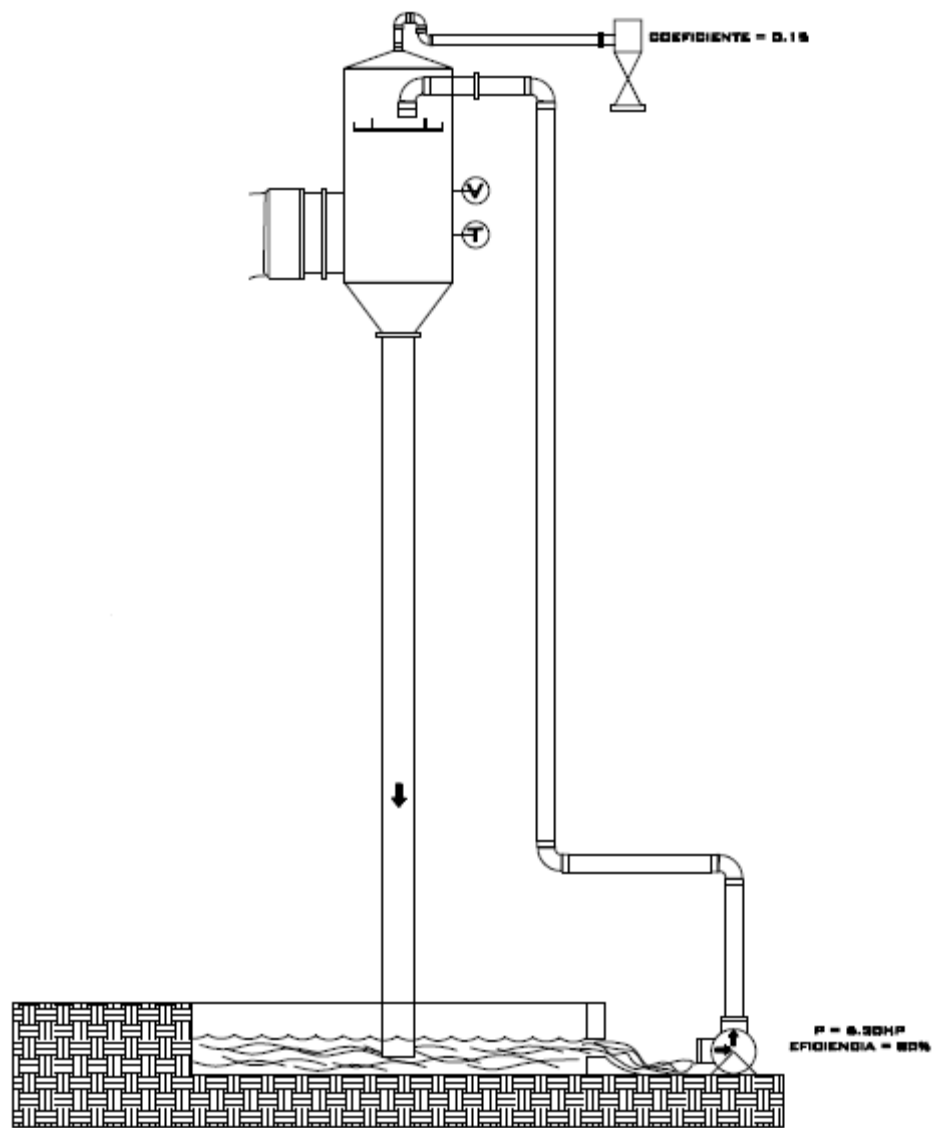
4.2.5 Diagrama del diseño para el soporte del equipo

Figura 18. Estructura de soporte para el condensador barométrico



4.2.6 Diagrama de flujo del sistema de condensación

Figura 19. Diagrama de flujo del sistema de condensación



4.3 Caracterización del condensador barométrico

Tabla IV. Caracterización del condensador barométrico

Capacidad de operación	210 toneladas de vapor/hora
Eficiencia teórica óptima	85,98%
Costo estimado de inversión inicial	Q. 465 000,00
Vida útil estimada	10 años.

FUENTE: Inciso 3.5 (págs. 39-55). Apéndice 3 (Tabla XIV, pág. 125)

5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

5.1 Dimensionamiento del condensador barométrico

En la tabla III se pueden observar todas las dimensiones y especificaciones obtenidas para el condensador barométrico trabajando en serie con un sistema de evaporación de un ingenio azucarero, donde procesan 5 000 toneladas de caña de azúcar al día. Al mismo tiempo, en la misma tabla se presentan las condiciones a las que el equipo debe trabajar óptimamente y los flujos tanto de entrada como de salida. A través de esta tabla se puede observar, que el condensador está diseñado para condensar 203 ton/h de vapor, lo cual lo hace a través de 1 172 ton/h de agua de enfriamiento.

Esto no quiere decir que el condensador diseñado no pueda trabajar a otras condiciones, sino que a estos flujos de vapor y de agua el condensador funciona a su máxima eficiencia de operación. Ahora bien, si fuera necesario trabajar a una mayor capacidad de condensación esto puede hacerse mediante la modificación ya sea del flujo del agua o bien de la capacidad del condensador. Sin embargo, es recomendable que se mantengan las condiciones de trabajo sugeridas en medida de lo posible; pero si es necesario realizar ajustes de operación que exceda la capacidad máxima, esto debe hacer mediante un estudio previo y mediante un balance detallado de masa y energía.

El cuerpo del condensador presentado posee dimensiones de 6,5 pies de diámetro por 12 pies de altura. Estas dimensiones establecen una relación de 2:1 tal que permiten tanto que el agua como el vapor fluyan a una velocidad adecuada. Esta velocidad permite que el tiempo de contacto entre los dos

fluidos sea la suficiente para que el total del calor latente de vaporización sea cedido al agua.

A pesar que las dimensiones del cuerpo del condensador permiten tener una correcta velocidad de flujo de vapor, esta no permite controlar la velocidad de flujo y la distribución del agua de enfriamiento dentro del cuerpo del condensador. Es por ello que es necesario colocar la bandeja perforada a una altura tal que permita la condensación del flujo total de vapor entrante, pero que al mismo tiempo deje espacio para la salida de los gases no condensables, esta altura corresponde a 8 pies sobre la línea de entrada del vapor. La bandeja perforada debe estar diseñada de tal manera que permita que el 10% del agua entrante salga por el agujero central, otro 10% desborde la bandeja, y el último 80% deje el condensador por medio de los agujeros circunferenciales. Esta distribución permite que el agua se distribuya uniformemente por todo el cuerpo del condensador y que no quede ningún espacio por el que el vapor pueda fluir sin ser condensado. El 10% del agua que desborda la bandeja incrementa la eficiencia del condensador, ya que esta moja las paredes del condensador y gran parte de la condensación se da en las paredes del equipo.

En la pierna del condensador, al igual que en las demás boquillas de entradas y salidas, el diámetro debe ser tal que permita un flujo a la velocidad óptima de diseño. Estas velocidades se han determinado mediante correlaciones empíricas y muestran las velocidades lineales a las que distintos fluidos presentan costos y condiciones de trabajo más favorables para el equipo. Además que al manejar un equipo a sus velocidades óptimas se reduce la corrosión con lo que se incrementa la vida útil del mismo.

Por otro lado, la altura de la pierna barométrica es de suma importancia; ya que esta es la que permite mantener el vacío en el equipo. El vacío alcanzado con una pierna de 34 pies es de alrededor 2 psia, el cual es un valor aceptable

para trabajar en el equipo de evaporación. Podría alcanzarse el vacío completo en el equipo, esto implicaría un incremento de cerca de 30% en el costo tanto inicial como de mantenimiento del condensador. Por lo tanto, en este caso las condiciones más favorables de trabajo en el equipo de evaporación y la posible reducción de costos variables no son justificadas por el aumento de los costos fijos.

El espesor del cuerpo del condensador es de $\frac{1}{2}$ de pulgada y debe ser construido con acero 4CR12. Este material aumenta levemente la inversión inicial del equipo, en cambio, incrementa en casi el doble la vida útil del mismo. Por lo tanto, en ocasiones como en estas es preferible que el costo inicial aumente, ya que este aumento se justifica con una disminución considerable del costo de mantenimiento. Sin embargo, como puede observarse en los resultados, las demás partes del equipo no serán construidas con el acero 4CR12 sino con acero al carbón. Esto se justifica ya que las condiciones a las que opera el resto del equipo no se da corrosión ni incrustación de manera significativa, por lo que el ahorro en el costo de mantenimiento no justificaría el aumento en los costos de inversión y de instalación.

5.2 Equipos y accesorios complementarios

Entre los accesorios complementarios a utilizar en la construcción del condensador barométrico se encuentra una enumeración con las bridas y pernos a utilizar para las conexiones entre las tuberías. Todas las bridas especificadas en el presente documento son de tipo BN4504 PN6. Este tipo de bridas fue elegido debido a que poseen un ángulo de reducción que permite que mantener una caída de presión controlada a través de los flujos de las distintas corrientes. En la *tabla V* se pueden encontrar las especificaciones de

cada una de las bridas a utilizar en el equipo así como de los pernos que se utilizan en las mismas. Aunque cada brida tiene sus propias especificaciones, el material y la forma de todas es la misma, lo cual permite mantener la presión adecuada en todas las entradas y salidas al cuerpo del evaporador.

Con el objetivo de disminuir la caída de presión en las tuberías, se han adicionado a los accesorios codos de 90°, 45° y tuberías auxiliares. Estos son utilizados para las conexiones del condensador barométrico con los equipos con los que este funciona en serie. Como se puede ver en la *Anexo 4*, en la conexión entre el último efecto del sistema de evaporación y el condensador barométrico se utiliza un codo de 90° conectado con una tubería auxiliar antes de ser conectada al cuerpo del condensador. Otra opción para la disposición de esta tubería es mediante la disposición de los dos codos conectados a 45°, lo cual disminuiría aún más la caída de presión, pero esta disminución no es significativa. Por el contrario, para la conexión de la bomba hidráulica con el condensador sí es necesario utilizar dos codos de 45°, ya que en este caso la disposición de ambos codos sí propicia una disminución significativa en la caída de presión.

Los instrumentos de medición colocados en el cuerpo del evaporador también son de suma importancia en el funcionamiento del mismo. Estos permiten controlar las condiciones a las cuales el equipo está funcionando. A través de estos instrumentos también se pueden detectar fallas en el equipo, como fugas, ya que una pérdida significativa del vacío del condensador indicaría ya sea una falla en el equipo; o bien un alza en la demanda de condensación.

Entre los equipos complementarios para el correcto funcionamiento del condensador se encuentran tanto a una bomba hidráulica como el eyector de gases no condensables.

Para el trasiego de agua se ha seleccionado una bomba centrífuga de 6 hp de potencia. Estas son muy versátiles en su funcionamiento y pueden ser encontradas en una amplia gama en el mercado. Además, las bombas centrífugas presentan costos iniciales, de instalación y de mantenimiento considerablemente bajos.

La potencia de la bomba fue determinado mediante la ecuación de continuidad, utilizando las cabezas de velocidad, altura, presión y fricción. Las cabezas de velocidad y de presión pueden ser despreciables, sin embargo, las cabezas de fricción y de altura son las que presentan una mayor exigencia de potencia. Es importante que se evite exceder la potencia especificada de la bomba ya que el sistema podría cavitarse, lo cual puede representar problemas para el funcionamiento del condensador, así como disminución de su vida útil.

El eyector de vapores no condensables fue especificado con un coeficiente de 0,015, el cual se obtiene por medio de tablas al relacionar las distintas áreas y capacidades esperadas, *Anexo 5*. Es aconsejable que en el condensador se cuente con dos eyectores conectados en paralelo, por si uno de ellos falla o está en mantenimiento; el otro puede estar funcionando. La función del eyector es importante para mantener el vacío dentro del condensador. Si los gases no condensables se acumulan en el cuerpo del condensador se reduce el área de contacto entre el vapor y el agua de enfriamiento, por lo tanto, se reduce la eficiencia del equipo.

Otra de las razones por las que es importante tener dos eyectores trabajando en paralelo es porque en caso de llegar a existir una fuga en el equipo el vacío en el mismo puede ser recuperado activando ambos eyectores simultáneamente. Aunque este escenario no es recomendado y debe ser evitado en medida de lo posible.

5.3 Diseño y especificaciones del condensador

En las figuras del inciso 4.3 (págs. 62-66) se puede observar el diseño de un condensador barométrico tipo *sprayer* de bandeja simple perforada. Este tipo de condensador fue elegido ya que presenta una eficiencia adecuada, una gran capacidad y un costo de instalación y mantenimiento relativamente bajo comparado con otras alternativas de condensadores barométricos. Permite controlar la velocidad de caída mediante un mecanismo simple, por lo que combina la efectividad de los condensadores tipo *sprayer* con la simpleza de los condensadores de bandeja.

La eficiencia teórica del condensador diseñado es de aproximadamente 86%. Esta eficiencia deberá mantenerse a 204 ton/h de vapor vivo a 7,5 psi y a una temperatura de 270 °C. Aunque la eficiencia real del condensador podría aumentar, ya que al ser un equipo que no se encuentra aislado térmicamente existe un flujo de calor hacia los alrededores, los cuales se encuentran a una temperatura inferior que la del condensador. También existe consumo adicional de calor para el calentamiento del equipo y la conservación de la temperatura.

Es importante recalcar que la eficiencia podría disminuir si no se trabaja a las condiciones para las que el condensador fue diseñado. También es necesario que la instalación y conexiones del equipo se lleven a cabo como están señaladas en el plano, ya que de no ser así la eficiencia se vería reducida, pero también la vida útil del equipo. Además, si el equipo no se encuentra asegurado correctamente, podría ser un riesgo potencial para la seguridad industrial de la empresa.

Sin embargo, aunque las condiciones de trabajo sean las especificadas y el equipo esté funcionando correctamente, es necesario que se programe un sistema de mantenimiento periódico preventivo. Este evitará fugas en el sistema y ayudará a prolongar la vida útil del equipo.

El costo del condensador diseñado asciende a los Q465 000,00. Este es el costo del condensador construido, incluye materiales, mano de obra, costos de energía durante la construcción. Sin embargo, para obtener el costo del condensador instalado es necesario agregar costos de transporte e instalación. Dicha inversión corresponde a un condensador barométrico construido en Guatemala, pero este monto no incluye los costos de la bomba ni de los eyectores de gases no condensables.

Es importante destacar que si este equipo se importa ya construido, el monto de la inversión inicial podría aumentar hasta cuatro veces. Esto se debe a que aunque los gastos de materia prima podrían disminuir, los gastos de transporte, aranceles e impuestos aumentarían; mientras que los gastos de instalación se mantendrían iguales.

CONCLUSIONES

1. Las dimensiones del cuerpo de un condensador barométrico tipo *sprayer* de bandeja perforada simple con una capacidad de 203 ton/h de vapor son de 6,5 pies de diámetro y 12 pies de altura.
2. Las dimensiones de la pierna barométrica de un condensador barométrico tipo *sprayer* de bandeja perforada simple con una capacidad de 203 ton/h de vapor son de 2,5 pies de diámetro por 34 pies de altura.
3. La bandeja perforada en el condensador barométrico diseñado debe tener un diámetro de cinco pies, una altura de 0,40 pies, un diámetro de agujero central de 0,65 pies y un espesor de $\frac{1}{4}$ de pulgada.
4. La eficiencia teórica del condensador diseñado es de 85,98%, la cual corresponde a las condiciones de proceso especificadas.
5. La inversión inicial del condensador barométrico diseñado asciende a Q465 000,00; para una vida útil de 10 años.

RECOMENDACIONES

1. La vida útil estimada para el condensador barométrico diseñado es de 10 años. Sin embargo, para que el condensador alcance esta, es necesario que se le dé mantenimiento preventivo por lo menos dos veces al año. Esto ayuda también a evitar que se den problemas durante el funcionamiento del equipo, asegurando así mayor eficiencia.
2. Es importante que se tenga un monitoreo continuo de las condiciones a las que se está operando el equipo, a través del manómetro, vacuómetro y termómetro. Esto permite detectar cuando existen fugas en el sistema, y permite además, tomar acciones correctivas de manera pronta y eficaz.
3. El condensador barométrico fue diseñado para una capacidad máxima de operación de 204 ton/h de vapor. Cuando se supera esta capacidad de operación el equipo podría presentar problemas durante su funcionamiento, lo cual puede tener repercusiones tanto a corto plazo sobre el sistema, como a largo plazo sobre el equipo.
4. El agua que sale del condensador barométrico es un agua que posee alta pureza y calor sensible. Debido a estas propiedades esta agua puede ser reutilizada, ya sea en el proceso de condensación, con un enfriamiento previo, o bien como alimentación de la caldera. Esto reducirá tanto incrustaciones como corrosión en los equipos.

5. Es importante evitar las fugas en todo momento, ya que aunque la pérdida del vacío en el equipo puede ser compensada con el uso de dos eyectores de manera simultánea, el equipo no funciona correctamente en esta disposición.

6. El condensador barométrico debe ser construido con las dimensiones y especificaciones detalladas en los planos. De otra manera, no se asegura el adecuado funcionamiento del equipo y la eficiencia se reduciría considerablemente. Además, podría afectar a la seguridad de los trabajadores.

7. La inversión inicial del equipo construido en Guatemala es de tres a cuatro veces menor que un equipo importado de otro país, por lo que es recomendable construirlo en el país para disminuir los costos fijos del proceso.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Bird, B y otros. Fenómenos de transporte. 2ª ed. España: Reverté, 1992. 242-263 pp.
2. Centro de Promoción de Tecnologías Sostenibles CPTS. Guía Técnica para la Producción. Chile, 2005.
3. Chen, James y Chou Chung. Manual de caña de azúcar: Un manual para los fabricantes de caña de azúcar y sus farmacias. 3ª edición en español. México, 1997. 60-82 pp.
4. Colinas, P. Diseño de tuberías para flujo por gravedad. 2ª ed. España: Reverté, 1983. 9, 90, 111-114 pp.
5. Franco Fernández, José Alberto. Diseño de una simulación por computadora de procesos de evaporación en una línea de evaporadores de múltiple efecto. Trabajo de graduación de Ing. Química. Guatemala. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2006.
6. Gaffert, G. Centrales de vapor. España: Reverté, 1981. 233-2374pp.
7. Graham Corporation. **Barometric condenser: Operation, maintenance and installation**. Nueva York, Estados Unidos, 1998.

8. Geankoplis, Christie. Procesos de Transporte y Operaciones Unitarias. 3^a ed. México: Continental, 1998. 765pp.
9. Hugot, E. Manual de ingeniería de la caña de azúcar. 3^a ed. Estados Unidos:Elsevier Scienci, 1986. 830-875pp.
- 10.Kern, Donad. Procesos de Transferencia de Calor. 3^a ed. México: Continental, 1995. 798 pp.
- 11.McCabe, Warren L. y otros. Operaciones Unitarias en Ingeniería Química. 7^a ed. México: McGraw Hill, 2007. 723 pp.
- 12.Perry, Robert H., Don W. Green. Manual del Ingeniero Químico. 7^a ed. Estados Unidos: Mc Graw Hill, 1997. 1862 pp.
- 13.Posadas, Orlando. Elegancia en el diseño. Centro de Innovación Tecnológica CENIT.
- 14.Smith, J.M. y otros. Termodinámica en Ingeniería Química. 6^a ed. México: Mc Graw Hill, 2003. 837 pp.
- 15.Texas AM University. **Optimization of a high-efficiency jet ejector**.
Artie McFerry. Department of Chemical Engineering.

ANEXOS

ANEXO 1

Tabla de requisitos académicos

Tabla V. Requisitos académicos para el diseño de equipo

No.	Curso	Tema	Aplicación en el diseño
1	Balance de masa y energía (IQ1)	Balance de masa	Determinación de los flujos másicos de entrada y de salida en cada parte del equipo.
2	Balance de masa y energía (IQ1)	Balance de energía	Determinación de las cantidades de calor necesarias en el sistema.
3	Balance de masa y energía (IQ1)	Psicometría	Determinación de las propiedades del licor a distintas concentraciones de azúcar.
4	Balance de masa y energía (IQ1)	Combustión	Determinación del requerimiento calórico en el sistema de evaporación.

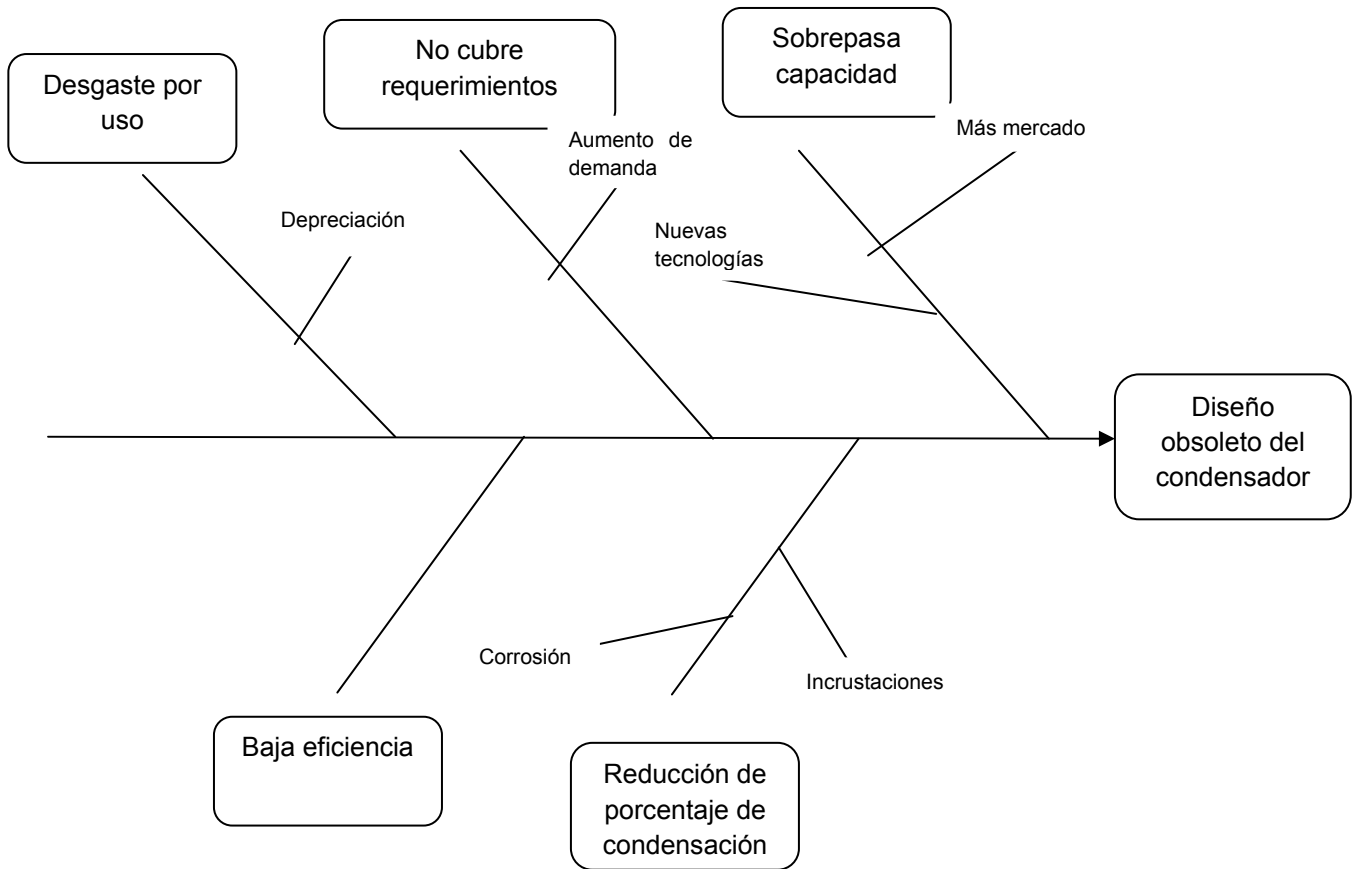
5	Flujo de fluidos (IQ2)	Ecuación de continuidad	Determinación de las áreas seccionales en distintas etapas del condensador.
6	Flujo de fluidos (IQ2)	Velocidad recomendada de diseño	Determinación de criterios de diseño.
7	Transferencia de calor (IQ3)	Transferencia de calor por convección.	Determinación de la cantidad de agua requerida en el condensador.
8	Transferencia de calor (IQ3)	Evaporación	Definición general de todo el proceso.
9	Transferencia de masa (IQ4)	Trasferencia de masa	Marco operativo y conceptos fundamentales del proceso.
10	Fisicoquímica 2	Equilibrios bifásicos	Puntos de equilibrio entre vapor-agua y condensado.
11	Termodinámica 3	Leyes de la termodinámica.	Principios operativos para generar criterios de diseño.
12	Procesos químicos	Proceso del azúcar	Características del proceso

	industriales.		de evaporación.
13	Diseño de equipo	Ecuaciones de diseño	Determinación y aplicación de criterios de diseño
14	Diseño de equipo	Diseño de la pierna barométrica	Relación entre conceptos, ecuaciones y criterios de diseño.
15	Diseño de equipo	Proceso de diseño	Metodología para el diseño del equipo.
16	Ingeniería económica 3	Balance económico	Selección de materiales y optimización de recursos.

ANEXO 2

Diagrama de causas y efecto del problema

Figura 20. Causas y efectos del problema



ANEXO 3

Propiedades del Acero 4CR12

Tabla VI. Rangos de composición para el acero 4CR12

Grade		C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo	Ni	N
1.4003	min.	-	-	-	-	-	10.50	-	0.30	-
S40977	max.	0.030	1.50	1.00	0.040	0.015	12.50	-	1.00	0.030
S41003	min.	-	-	-	-	-	10.5	-	-	-
	max.	0.03	1.50	1.00	0.040	0.030	12.5	-	1.50	0.030

Tabla VII. Propiedades mecánicas para el acero 4CR12

Grade	Tensile Strength (MPa) min	Yield Strength 0.2% Proof Stress (MPa) min	Elongation (% in 50mm) min	Hardness	
				Rockwell (HR) max	Brinell (HB) max
1.4003	450 650	280 (long.) 320 (trans.)	20	-	-
S40977	450	280	18	HR B88	180
S41003	455	275	18	HR C20	223

Tabla VIII. Propiedades físicas para el acero 4CR12

Grade	Density (kg/m ³)	Elastic Modulus (GPa)	Mean Coefficient of Thermal Expansion (µm/m/°C)			Thermal Conductivity (W/m.K)		Specific Heat 0-100°C (J/kg.K)	Electrical Resistivity (nΩ.m)
			0-100°C	0-300°C	0-700°C	at 100°C	at 500°C		
3CR12	7740	200	10.8	11.3	12.5	30.5	40	480	570

Tabla IX. Especificaciones por grado del acero 4CR12

Grade	UNS No	Old British		Euronorm		Swedish SS	Japanese JIS
		BS	En	No	Name		
3CR12	S40977	-	-	1.4003	X2CrNi12	-	-

These comparisons are approximate only. The list is intended as a comparison of functionally similar materials **not** as a schedule of contractual equivalents. If exact equivalents are needed original specifications must be consulted.

Tabla X. Posibles alternativas para el acero 4CR12

Grade	Why it might be chosen instead of 3CR12
304	Better corrosion resistance and fabrication properties are required.
430	Better corrosion resistance and appearance is required. Weldability not needed.
Galvanised steel	A lower cost is required, and the reduced corrosion resistance and fabrication characteristics of galvanised steel are acceptable.
Weathering steel	A lower cost is required, and the reduced corrosion resistance and fabrication characteristics of weathering steel are acceptable.

ANEXO 4

Instalación correcta del condensador barométrico

Figura 21. Correcta instalación de línea de vapor

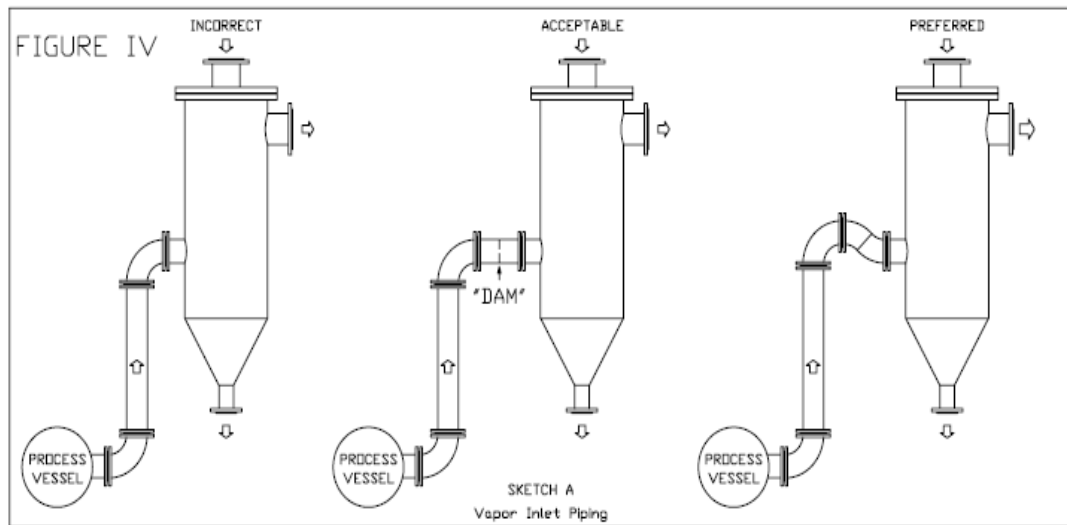


Figura 22. Correcta instalación de línea de gases

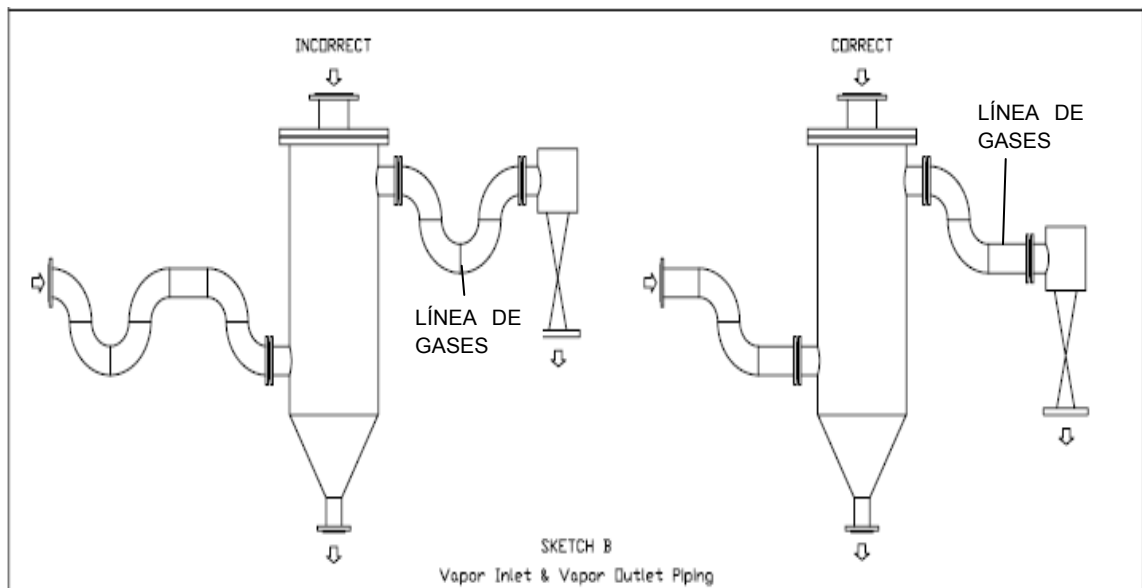


Figura 23. Salida de mezcla de la pierna

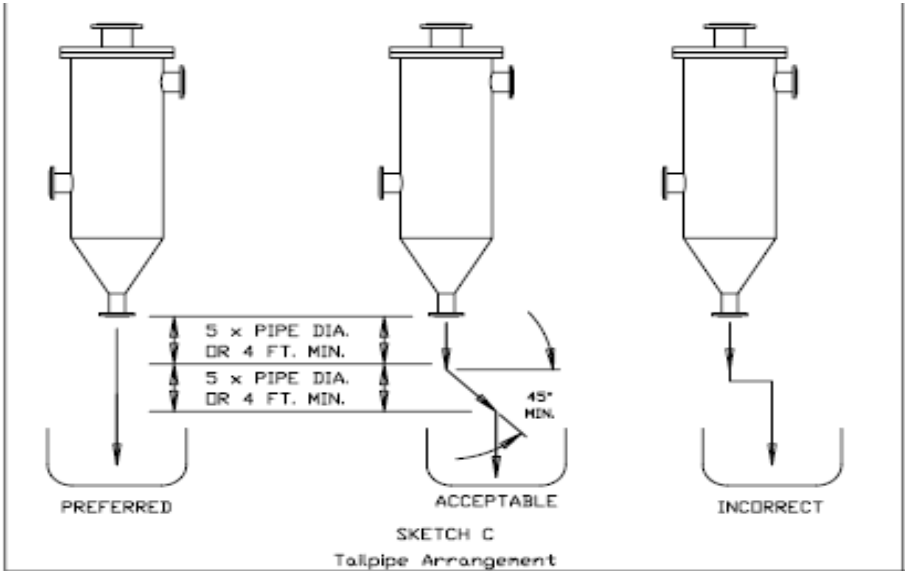
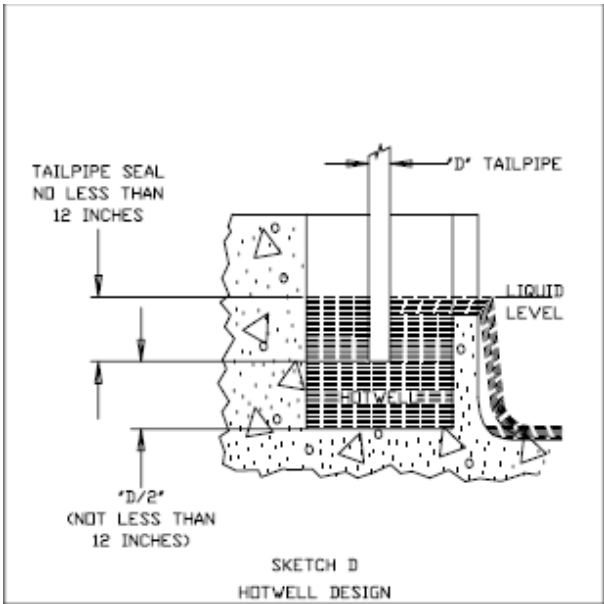


Figura 24. Instalación de pierna



ANEXO 5

Caracterización de los eyectores de gases no condensables

Figura 25. Curva para el diseño óptimo de eyectores simples

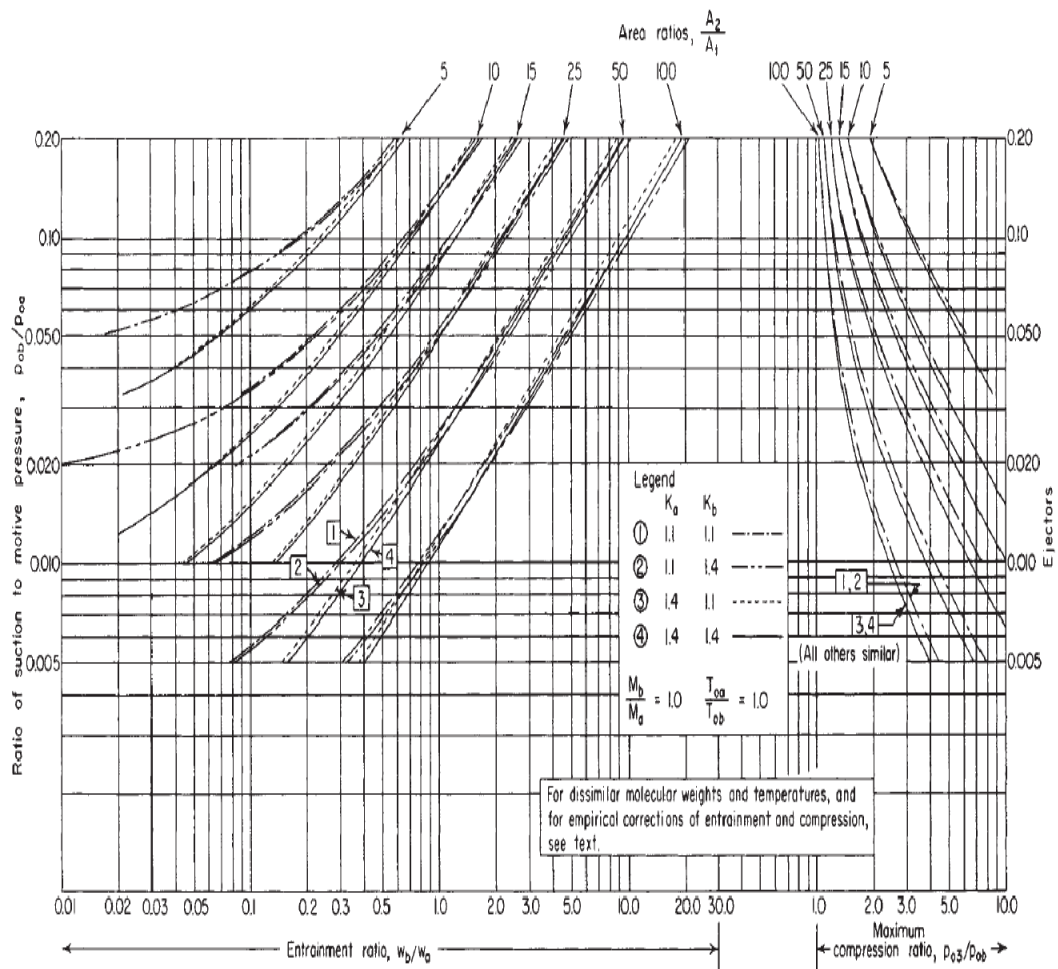


FIG. 10-102 Design curves for optimum single-stage ejectors. [DeFrate and Hoerl, Chem. Eng. Prog., 55, Symp. Ser. 21, 46 (1959).]

APÉNDICES

APÉNDICE 1

Proceso de diseño

El diseño de un equipo es un proceso que se puede dividir en varias etapas. Es necesario inicialmente observar el problema al que se desea dar solución como un todo para posteriormente ir definiendo variables, criterios, requisitos y limitaciones. Y de esta manera seguir una secuencia lógica de pasos para finalmente poder llegar al diseño adecuado.

Si se sigue de una manera adecuada cada una de las partes del proceso de diseño deberá llegarse finalmente a la presentación técnica de un equipo diseñado de manera óptima para el problema y el sistema planteado inicialmente.

Existen distintos modelos para el diseño en ingeniería*, dentro de los cuales suelen variar los pasos y el número de los mismos; pero el fondo dentro de su estructura y metodología no es diferente. A continuación se plantean los pasos del método genérico para el diseño de un equipo impartido en el curso de diseño de equipo en la Escuela de Ingeniería Química en la Universidad de San Carlos de Guatemala.

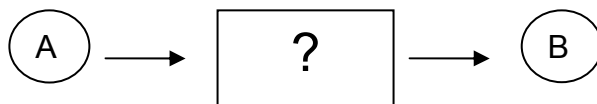
*Para consultar otros modelos para el diseño de un equipo en Ingeniería, consultar la Referencia Bibliográfica No. 5 del presente documento.

1. Macroanálisis

Esta etapa del diseño consiste en realizar un análisis del problema que se desea resolver. A través del macroanálisis se determina la situación actual y a la situación a la que se deberá llegar al resolver el problema. Esta etapa permite visualizar la situación de una manera general sin necesidad de entrar en detalles sobre cómo se solucionará el problema, lo que permite ampliar mucho más las posibilidades y no limitarse únicamente a las dos o tres alternativas más comunes. Esta etapa también permite delimitar el problema de una manera adecuada. Cabe mencionar, que una de las principales objetivos de la etapa del macroanálisis es determinar si el problema planteado vale la pena o no ser resuelto, pues si el problema no vale la pena ser resuelto se estará ahorrando mucho tiempo y esfuerzo con esta etapa.

Para realizar el macroanálisis se utiliza el método de la *caja negra*. Este método consiste en definir en un estado A la situación en la que se encuentra el sistema en la actualidad y en un estado B la situación a la que se desea llegar. Ambas situaciones se conectan entre sí mediante un recuadro en el cual no se colocan datos.

Figura 26. Método de la caja negra para el macroanálisis de un problema



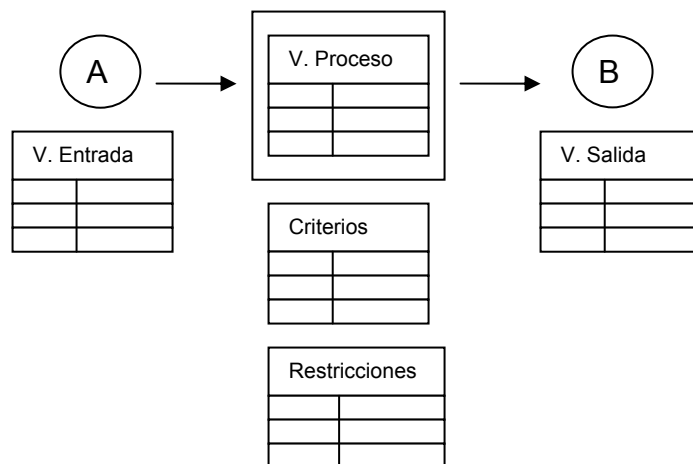
2. Microanálisis

Durante la etapa de microanálisis se toma como base la etapa 1. La diferencia es que aquí debe procederse a especificar valores de las variables de entrada, variables de salida, variables de proceso, criterios y restricciones.

Las restricciones son limitaciones impuestas por aspectos de tipo económico, legal, cultural, etc.

Esta etapa del proceso del diseño conlleva un estudio y conocimiento previo del sistema para el cual se está diseñando, para poder así definir condiciones con un pleno conocimiento del sistema que se estudia. Es importante que todo el equipo atienda a las necesidades de operación de la fábrica. Además, debe tenerse mucho cuidado de no imponer restricciones innecesarias que puedan limitar la búsqueda de alternativas.

Figura 27. Método de la caja negra para el microanálisis de un problema

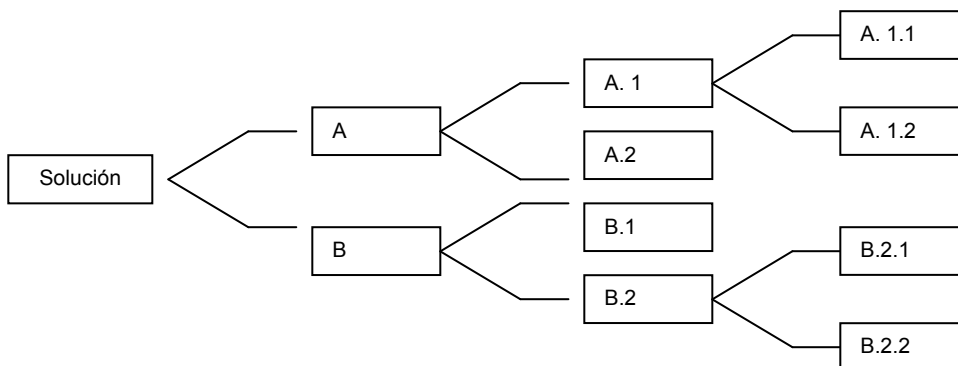


3. Búsqueda de alternativas

Tras haber definido, todas la variables que afectan en el proceso estudiado y delimitado los valores de las mismas; se puede proceder a realizar una búsqueda de todos aquellos equipos que pueden ayudar a solucionar el problema planteado inicialmente. Es importante que durante esta búsqueda de alternativas se busque la mayor cantidad y diversidad de opciones posibles, no solo aquellas que sean más comunes; sino que cualquier alternativa que pueda ayudar a solucionar el problema y que cumpla con las especificaciones establecidas.

El método más común para realizar la búsqueda de alternativas es mediante el método de *árbol de alternativas*. Este método permite ordenar todas aquellas opciones dentro de sus respectivas clases y sub-clases. De esta forma se puede visualizar de una manera adecuada todas las opciones que se poseen para su posterior delimitación.

Figura 28. Método del árbol de alternativas



4. Selección preliminar

Durante la selección preliminar de alternativas se eligen únicamente aquellas que son más viables y se eliminan todas las que no lo son. Para realizar esta selección es muy importante tener un amplio conocimiento y experiencia en el tema. La evaluación de alternativas puede requerir una serie de decisiones en las cuales el resultado de una etapa es importante para la siguiente etapa en la toma de decisiones. Cuando es posible definir claramente cada alternativa económica y se desea considerar explícitamente el riesgo, es útil realizar la evaluación utilizando un árbol de decisiones, el cual incluye:

- Más de una etapa de selección de alternativas.
- La selección de una alternativa en una etapa conduce a otra etapa.

Es importante mencionar que para la selección preliminar se deben tomar en cuenta distintos criterios, entre los más importantes se puede mencionar:

1. Economía: este criterio permite escoger aquellas alternativas que constituyen menores costos de inversión y operación. Durante esta etapa se pueden realizar análisis económicos preliminares, o bien se pueden escoger las alternativas basadas en la teoría o experiencia, ya que posteriormente se hará una evaluación económica detallada de cada una de las alternativas seleccionadas.
2. Operabilidad: este criterio se refiere al nivel de facilidad o dificultad que representa el manejo de determinado equipo. Es preferible elegir aquellos equipos cuyo manejo no requieren de operarios con alto nivel de capacitación.

3. Mantenibilidad: es preferible seleccionar aquellos equipos cuyo diseño no posea demasiados ángulos rectos, ya que estos dificultan la limpieza y mantenimiento del mismo. Además, aquellas opciones que implican mayor cantidad de partes móviles sujetas a desgastes, también implican mayores costos y mayor tiempo de mantenimiento.
4. Seguridad personal: en este criterio deben evaluarse todos aquellos posibles riesgos que el equipo puede representar para el operario. Es preferible elegir aquellos equipos que constituyan un menor riesgo.
5. Seguridad ambiental: consiste en considerar los riesgos pueden generar al ambiente. Entre estos riesgos se pueden mencionar emisión de gases, efluentes líquidos, ruido, calor, entre otros.
6. Versatilidad: en este rubro se considera si alguna o varias de las alternativas evaluadas son útiles para diversos fines. Es preferible la utilización de un equipo que cumpla con varias funciones a la utilización de dos o más equipos que realizan una única función, ya que esto implica un menor costo de inversión y de operación.
7. Confiabilidad: es sumamente importante que los equipos elegidos sean confiables, es decir que posean una probabilidad baja para fallar durante su funcionamiento. Hoy en día existen muchas industrias en las que se trabaja la mayor parte del día, y una falla inesperada en el equipo implicaría una pérdida de tiempo que no había sido contemplada; la cual conllevaría a una reducción en la producción y por lo tanto en las

ganancias. Además, la falta de confiabilidad en un equipo implica también un riesgo para operarios y demás trabajadores.

8. Compatibilidad: la compatibilidad es la adaptabilidad de las alternativas evaluadas al equipo ya existente. Es importante tomar en cuenta que los equipos nuevos deben adaptarse al sistema y no al revés, pues esto implicaría una pérdida innecesaria de dinero.

9. Eficacia: es importante que aunque se busca las alternativas más económicas, seguras y versátiles se debe buscar antes que todo que las alternativas cumplan de una manera adecuada y óptima con la función para la cual se están diseñando.

10. Elegancia: este criterio consiste en la selección de las opciones más simples e inteligentes. No es conveniente la utilización de metodologías complicadas cuando se puede obtener los mismos resultados con un diseño más sencillo.

Como se puede observar muchos de los criterios para la selección de alternativas son dependientes entre sí. Sin embargo, estos criterios pueden variar según la naturaleza del equipo y la industria para la que se esté diseñando.

5. Desarrollo del modelo

La selección preliminar de alternativas deberá llevar a tener dos o tres posibles opciones de equipos, los cuales serán los más viables para el sistema que se está evaluando. De estas alternativas deberá procederse a realizar un diseño propiamente dicho con las variables, criterios y restricciones previamente establecidas.

El diseño detallado tiene que ver con la especificación de detalles algorítmicos, representaciones concretas de datos, interconexiones entre funciones y estructuras de datos. El punto de inicio para el diseño detallado es una estructura arquitectónica a la que se van a adicionar detalles y representaciones concretas de datos. Es en esta etapa del diseño en donde se deben utilizar una serie de ecuaciones de diseño, mediante las cuales se interrelacionan todas las variables de entrada y así poder obtener una serie de variables de salida para posteriormente poder generar un bosquejo preliminar de cada uno de los equipos seleccionados.

Una especificación adecuada durante el diseño preliminar detallado, minimiza el número de errores e imperfecciones durante el funcionamiento de los equipos, aumentando así la confiabilidad y reduciendo el riesgo. Al final de esta etapa de diseño se deberá llegar a poder definir de una manera más específica el sistema:

- Dimensiones.
- Materiales.
- Partes.

6. Evaluación Económica

Uno de los aspectos a evaluar en el diseño de todo equipo es el aspecto económico, debido a que a través de estas evaluaciones se puede determinar la rentabilidad del proyecto, además, permite elegir la mejor alternativa a utilizar. El estudio económico determina los costos totales en que incurrirá el proyecto, clasificándolos en costos de producción, administración, de ventas, financieros, etc.

Ayuda mucho en el estudio económico, el desarrollo del punto de equilibrio, ya que presenta una idea de los costos, ingresos por ventas y costos total con base en el nivel de producción. Otro elemento importante a determinar aquí es la tasa mínima atractiva de rendimiento (TMAR), la cual dependerá de las fuentes de financiamiento.

Finalmente, el estudio económico debe señalar los estados de resultados de forma, fundamentalmente el estado de ganancias y pérdidas y el balance general, pero es indispensable y será con el que se hará la evaluación económica el *flujo neto de efectivo proyectado*.

7. Presentación técnica

Esta es la parte del diseño de equipo en la que se resume y condensa los resultados obtenidos a lo largo de todo el proceso. Por lo general estos datos se presentan en un documento formal en el cual se especifican los resultados y los medios que se utilizaron para llegar a los mismos.

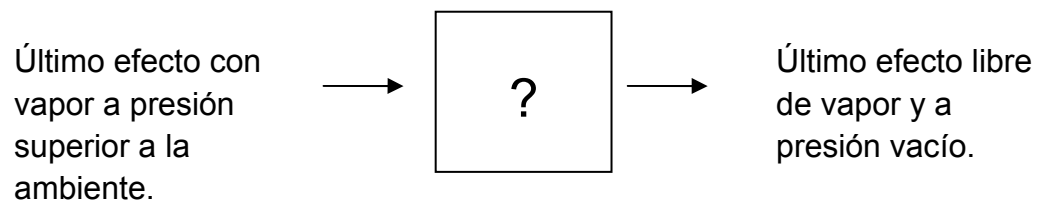
Una parte fundamental de la presentación técnica es la selección del equipo que finalmente deberá ser construido. Dicha selección deberá ir acompañado de un plano o maqueta a escala que especifique las dimensiones a las que se llegó mediante los algoritmos.

A continuación se presenta un ejemplo de las etapas previas al desarrollo del modelo en el caso propio del condensador barométrico evaluado en el presente trabajo de investigación.

8. Proceso de diseño del condensador barométrico

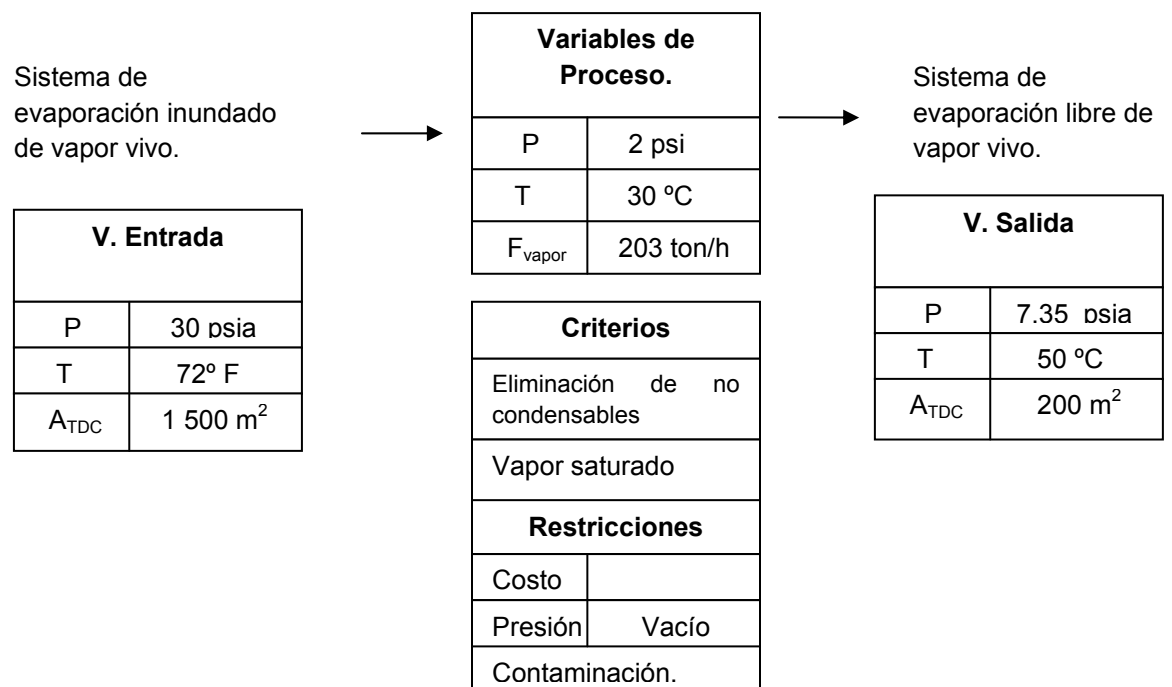
- MACROANÁLISIS PARA EL SISTEMA ANALIZADO.

Figura 29. Macroanálisis del condensador



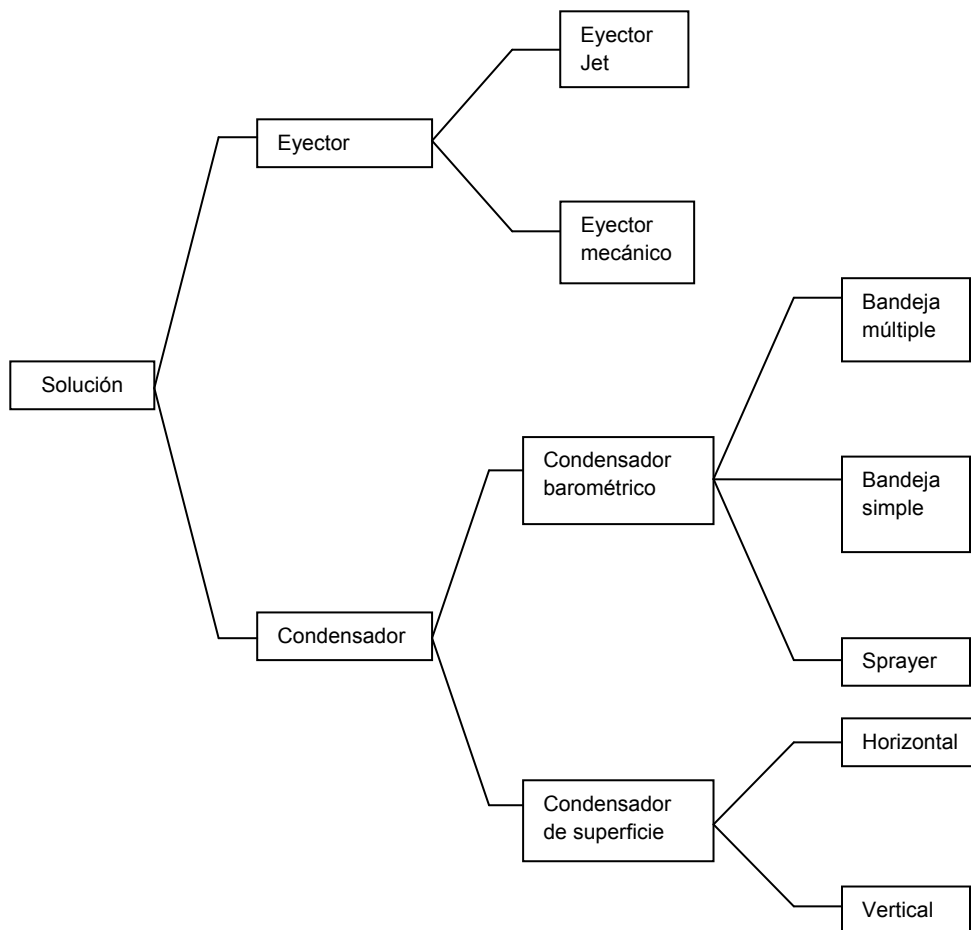
- MICROANÁLISIS PARA EL SISTEMA ANALIZADO.

Figura 30. Microanálisis del condensador



- BÚSQUEDA DE ALTERNATIVAS PARA EL SISTEMA ANALIZADO.

Figura 31. Selección de alternativas



- SELECCIÓN PRELIMINAR PARA EL SISTEMA ANALIZADO

Por los costos tanto fijos como variables y las condiciones a las que debe trabajar el sistema evaluado, las opciones seleccionadas para ser desarrolladas son:

- Condensador de superficie horizontal.
- Condensador barométrico de bandeja simple.

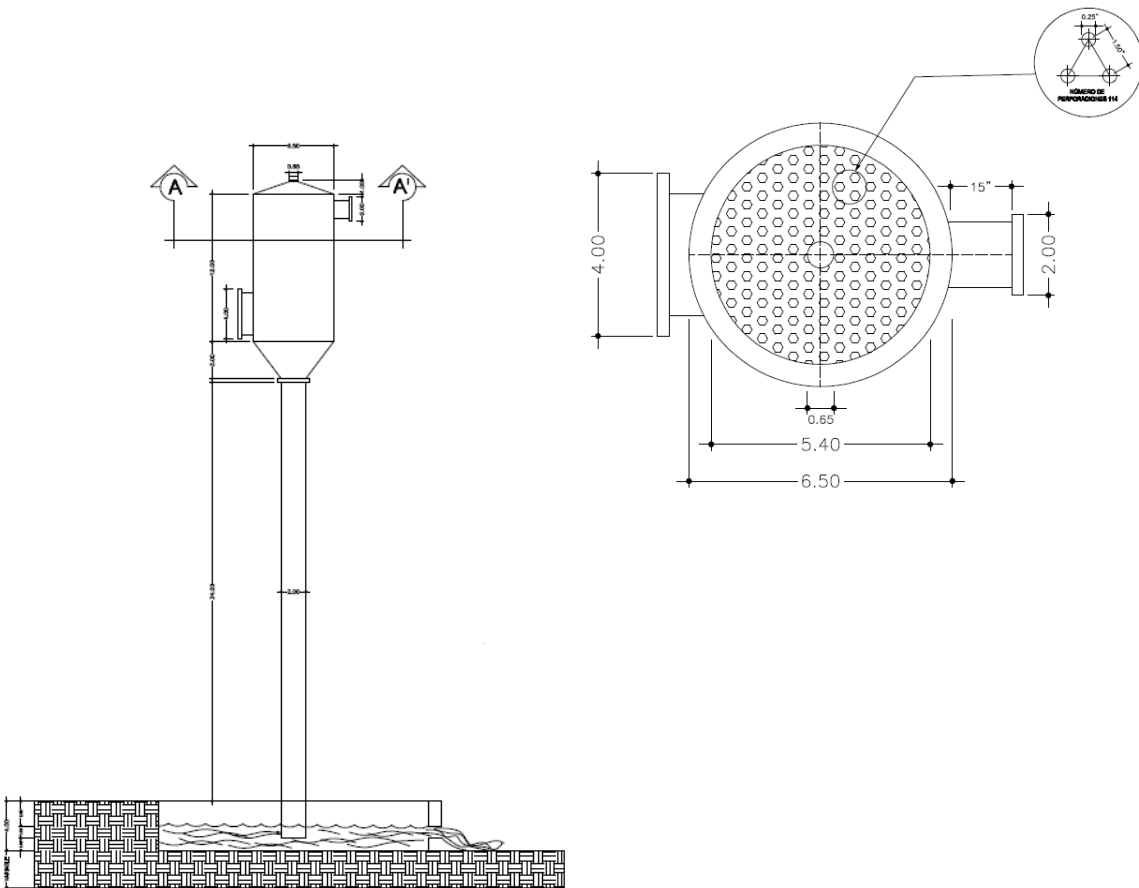
Ambas opciones remueven el vapor del último efecto del sistema de evaporación, con un costo energético mínimo, pues el costo variable más significativo es el del consumo energético de la bomba hidráulica. Sin embargo, ambos condensadores necesitan un eyector de gases no condensables, pero el consumo energético de estos es despreciable porque el flujo que se debe eliminar no supera la tonelada por hora. Además, los dos equipos seleccionados presentan altas eficiencias y manejo simple, en comparación con los eyectores.

Al no poseer partes móviles los costos de mantenimiento de los equipos seleccionados disminuye considerablemente. Por otro lado, debido a las partes y las estructuras del condensador de superficie; este presenta un costo de inversión inicial más elevado. Para poder tomar la decisión final entre ambas alternativas es necesario llegar a una evaluación financiera profunda en la cual se tomen en cuenta tanto costos fijos como costos variables de cada uno de los equipos.

- DESARROLLO DEL MODELO.

Ver sección 3. Del presente trabajo.

Figura 32. Desarrollo del modelo



APÉNDICE 2

Equipos y accesorios complementarios en el condensador barométrico

1. Caracterización de bridas y pernos

Las bridas que se utilizarán para conectar el equipo con las tuberías de entrada y de salida serán de tipo BS4504 estilo 112/8. Estas brindan la resistencia adecuada a los cambios bruscos de presión y temperatura que se dan dentro del condensador barométrico.

A continuación se presenta una tabla con la caracterización de las distintas bridas en el equipo.

Tabla XI. Caracterización de las bridas en el condensador barométrico (mm)

Bridas Dimensiones	Entrada de vapor	Entrada de agua	Salida No condensables	Salida Mezcla
Diámetro encontrado	1275,18	460,25	141,15	921,62
Diámetro nominal	1000	500	150	900
Diámetro exterior	1600	685	300	1400
Espesor de la brida	72	50	28	65
Longitud del jefe de brida	130	84	52	122
Radio de la esquina	12	12	8	12
Diámetro del jefe	725	522	200	680

FUENTE: Hugot. Manual de ingeniería de caña de azúcar. Págs. 873-875.

Con base en los diámetros nominales ya establecidos para las bridas se pueden determinar las características de los pernos que se deben utilizar.

Tabla XII. Caracterización de pernos para bridas (mm)

Bridas Dimensiones	Entrada de vapor	Entrada de agua	Salida No condensables	Salida Mezcla
Diámetro nominal	1000	500	150	900
Diámetro de perno	900	670	250	875
Diámetro del agujero	52	45	26	50
Número de hoyos	25	20	8	22
Tamaño de los pernos	M50	M39	M24	M42

FUENTE: Hugot. Manual de ingeniería de caña de azúcar. Págs. 873-875.

2. Caracterización de la bomba

La bomba para impulsar el flujo del agua hacia la entrada del condensador barométrico es de tipo centrífuga. Esto se determina tanto mediante las características del fluido, agua, como por las condiciones a las que la bomba debe operar. Además, las bombas centrífugas brindan una inversión inicial baja y una amplia gama de estilos y capacidades, ocupan poco espacio y producen un flujo suave no pulsante.

Para determinar la potencia de la bomba se utiliza la ecuación de continuidad:

$$\dot{W}_f \cdot \eta = (\Delta P / \rho + \Delta Z g / g_c + \Delta V^2 / 2g_c + HFT) \dot{m}$$

(Ecuación No. 28)

En donde:

\dot{m} =flujo másico de descarga (lb/s)

HFT=cabeza de fricción (gradys)

ΔV = diferencial de velocidad (ft/s)

g_c = compatibilizador (lbF/lbm)

g = aceleración por gravedad (ft/s²)

ΔZ =diferencial de altura (ft)

ΔP =diferencial del presión (psi)

ρ = densidad (lb/ft³)

η =eficiencia de la bomba (abs)

\dot{W}_f =potencia de la bomba (hp)

Sustituyendo datos:

$$(6,5616 \text{ ft/s} / 2(32,178 \text{ lbF/lbm}) + (32, 2 \text{ ft/s})(40 \text{ ft})/(32,178 \text{ lbF/lbm}) + 13 \text{ psia} / 62,23 \text{ lb/ft}^3) 3 \text{ 9063,33 lb/s} = \eta * \dot{W}_f$$

$$(0,10195 + 40,027 + 0, 2895) 3 \text{ 9063,33 lb/s} = \eta * \dot{W}_f$$

Estableciendo una eficiencia de bomba de 80%:

$$15,78869 = (0.80)\dot{W}_f$$

$$\dot{W}_f = 6,27 \text{ hp}$$

3. Caracterización de eyector de no condensables

Para caracterizar el eyector es necesario detallar las condiciones a las que el mismo funcionará.

Tabla XIII. Caracterización del eyector de gases no condensables

Parámetro	Valor
Presión de entrada	28 mmHg
Temperatura de entrada	45 °C
Flujo másico del los gases no condensables	11,94 ton/h
Fluido sello	Agua
Temperatura del agua de enfriamiento	26 °C
Presión de descarga	15 psia

FUENTE: Inciso 3.5, páginas 31-39.

Para calcular las especificaciones preliminares que se darán al fabricante es necesario determinar las relaciones entre las presiones de succión y las presiones de descarga. Determinando datos del *Anexo 3*.

La relación de compresión se define como:

$$\frac{P_D}{P_S} = \frac{15\text{psi}}{2\text{psi}} = 7,5$$

(Ecuación No. 29)

En donde:

P_s = presión de succión (psi)

P_d = presión de descarga (psi)

La relación de presión está dada por:

$$\frac{P_s}{P_e} = \frac{2\text{psi}}{35\text{psi}} = 0,05$$

(Ecuación No. 30)

En donde:

P_s = presión de succión (psi)

P_e = presión de eyector (psi)

Para determinar la razón de arrastre, se utiliza la siguiente ecuación:

$$\frac{W_s}{W_D} = \frac{295,13}{385,13} = 0,7663$$

(Ecuación No. 31)

En donde:

W_s = flujo de agua de succión (kg/s)

W_D = flujo de agua de arrastre (kg/s)

Por lectura de la gráfica “Curvas para diseño óptimo de eyectores simples” (Anexo 3), se obtiene la relación entre las áreas del eyector:

$$\frac{A_2}{A_1} = 15$$

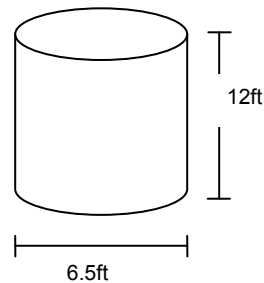
Con una relación de áreas de 15 y una relación de compresión de 7,5, se obtiene un eyector con un factor de 0,015. Este es un factor que relaciona las características y condiciones del eyector y que permite caracterizarlo universalmente.

APÉNDICE 3

Análisis de costos

1. Costo del cuerpo del condensador

Figura 33. Dimensiones del cuerpo del condensador



- Determinación del área de la lámina:

$$\text{Dimensiones de la lámina} = 6 \times 20 \text{ ft}$$

$$\text{Área} = 6 \text{ ft} * 20 \text{ ft} = 120,00 \text{ ft}^2$$

- Determinación del peso por lámina:

$$\text{Volumen} = 120,00 \text{ ft}^2 * 0,04166 \text{ ft} = 4,99 \text{ ft}^3$$

$$\text{Peso (kg)} = \frac{4,99 \text{ ft}^3}{3,28} * \frac{785 \text{ kg}}{\text{m}^3} = 1\ 196,50 \text{ kg}$$

- Determinación del costo por lámina:

$$\text{Costo de la lámina} = 1\ 196,50 \text{ kg} * \text{Q15/kg} = \text{Q17\ 947,50/lámina}$$

- Determinación del número de láminas a utilizar:

Dimensiones necesarias para el cuerpo del condensador:

$$\text{Perímetro} = \pi(6) \text{ ft} = 21,13 \text{ ft}$$

$$\text{Área} = \pi(6)(12) \text{ ft}^2 = 72,0 \text{ ft}^2$$

$$\text{Número de planchas} = \frac{120,0 \text{ ft}^2}{72,0 \text{ ft}^2} = 1,76$$

Número de láminas: 2

A este material, fue necesario agregar las láminas requeridas para la fabricación del área de no condensables y la salida de la mezcla. Lo cual equivale a dos láminas de acero 4CR12 más:

Número total de láminas: 4

- Determinación del costo total de materia prima:

Costo total por materia prima= Q71 790,00

- Determinación del costo por soldado:

Según cotización, el costo de soldadura incluyendo costo de electrodos de cada plancha de acero 4CR12 es de Q1 200,00 por cada hilo de metro lineal.

$$\text{Metros lineales soldados} = ((21,13)*2 + 12 + 5 + 5) \text{ft} / 3,28 = 49,46\text{m}$$

$$\text{Costo por una línea de soldado} = 49,46\text{m} * \text{Q1 200,00} = \text{Q59 363,43}$$

$$\text{Costo por cuatro hilos de soldado} = \text{Q608,00} * 4 = \text{Q2 432,00}$$

$$\text{Costo por unión} = \frac{6,8 * \pi * t}{3,28\text{m}} * 400 * 4 = \text{Q9 961,15}$$

- Determinación de rolado:

Según cotización, el costo de rolado de cada plancha de acero 4CR12 es de Q5 000,00/lámina.

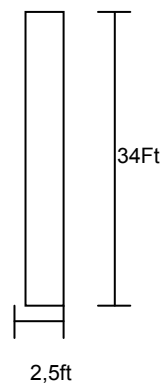
$$\text{Costo por rolado} = \text{Q5 000,00/ lámina} * 4 \text{ láminas} = \text{Q20 000,00}$$

- COSTO TOTAL DEL CUERPO DEL CONDENSADOR:

Q163 546, 50

2. Costo de la pierna barométrica

Figura 34. Dimensiones de la pierna barométrica



- Determinación del área de la lámina:

Dimensiones de la lámina = 5 X 20ft

$$\text{Área} = 5\text{ft} \times 20\text{ft} = 120\text{ft}^2$$

- Determinación del peso por lámina:

$$\text{Volumen} = 120\text{ft}^2 \times 0,04166 \text{ ft} = 4,992\text{ft}^3$$

$$\text{Peso (kg)} = \frac{4,99\text{ft}^3}{3,28} * \frac{785\text{kg}}{\text{m}^3} = 1\,196,50\text{kg}$$

- Determinación del costo por lámina:

$$\text{Costo de la lámina} = 1\,196,5\text{kg} * Q8/\text{kg} = Q9\,571,64$$

- Determinación del número de láminas a utilizar:

Dimensiones necesarias para el cuerpo del condensador:

$$\text{Perímetro} = \pi(3) \text{ ft} = 9,42 \text{ ft}$$

$$\text{Área} = \pi(3)(34) \text{ ft}^2 = 320,0 \text{ ft}^2$$

$$\text{Número de planchas} = \frac{320,0 \text{ ft}^2}{120 \text{ ft}^2} = 2,6$$

Número de láminas: 3

- Determinación del costo total de materia prima:

Costo total por materia prima = 3 láminas x Q9 571,64 /lámina = Q28 714,92

- Determinación del costo por soldado:

Según cotización, el costo de soldadura incluyendo costo de electrodos de cada plancha de acero al carbón es de Q400,00 por cada hilo de metro lineal.

Metros lineales soldados = $(9,42\text{ft} + 34 \text{ ft}) / 3,38 = 43,42 \text{ m}$

Costo por una línea de soldado = $43,42\text{m} \times \text{Q}400,00 / \text{m} = \text{Q}17 368,00$

Costo por cuatro hilos de soldado = $\text{Q}608,00 * 4 = \text{Q}2 432,00$

Costo por unión = $\frac{6,8 * \pi \text{ft}}{3,28\text{m}} * 400 * 4 = \text{Q}9 961,15$

- Determinación de rolado:

Según cotización, el costo de rolado de cada plancha de acero al carbón es de Q4 000,00/lámina.

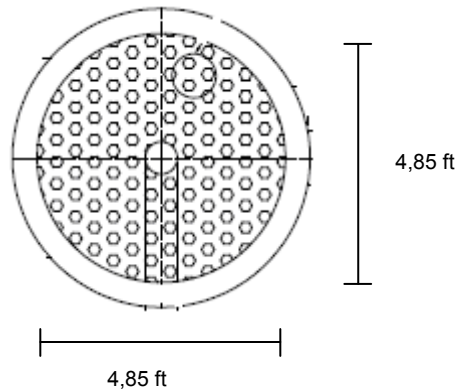
$$\text{Costo por rolado} = \text{Q4 000,00/lámina} * 3 \text{ láminas} = \text{Q12 000,00}$$

- COSTO TOTAL DE LA PIERNA BAROMÉTRICA:

Q70 476,07

3. Costo de la bandeja perforada

Figura 35. Dimensiones de la bandeja perforada



- Determinación del área de la lámina:

Dimensiones de la lámina = 6 x 10 ft

$$\text{Área} = 6\text{ft} * 10\text{ft} = 60\text{ft}^2$$

- Determinación del peso por lámina:

$$\text{Volumen} = 60\text{ft}^2 * 0,04166\text{ft} = 2,5\text{ft}^3$$

$$\text{Peso (kg)} = \frac{2,50\text{ft}^3}{3,28} * \frac{785\text{kg}}{\text{m}^3} = 598\text{kg} \approx 600\text{kg}$$

- Determinación del costo por lámina:

$$\text{Costo de la lámina} = 600\text{kg} * \text{Q}15/\text{kg} = \text{Q}9\,000,00/\text{lámina}$$

- Determinación del número de láminas a utilizar:

Dimensiones necesarias para la bandeja perforada:

$$\text{Área} = \pi(6) \text{ft}^2 = 18,89 \text{ft}^2$$

$$\text{Número de planchas} = \frac{18,89\text{ft}^2}{60 \text{ft}^2} = 0,31$$

Número de láminas: 1

- Determinación del costo total de materia prima:

Costo total por materia prima = Q9 000,00

- Determinación del costo por fresado:

Según cotización, el costo de fresado es de Q2,50 por agujero. De manera que el costo de fresado para el total de agujeros en la bandeja del condensador asciende a:

113 agujeros * Q2,50/agujero = Q282,50

- COSTO TOTAL DE LA BANDEJA PERFORADA:

Q9 282,50

4 Costo total del condensador

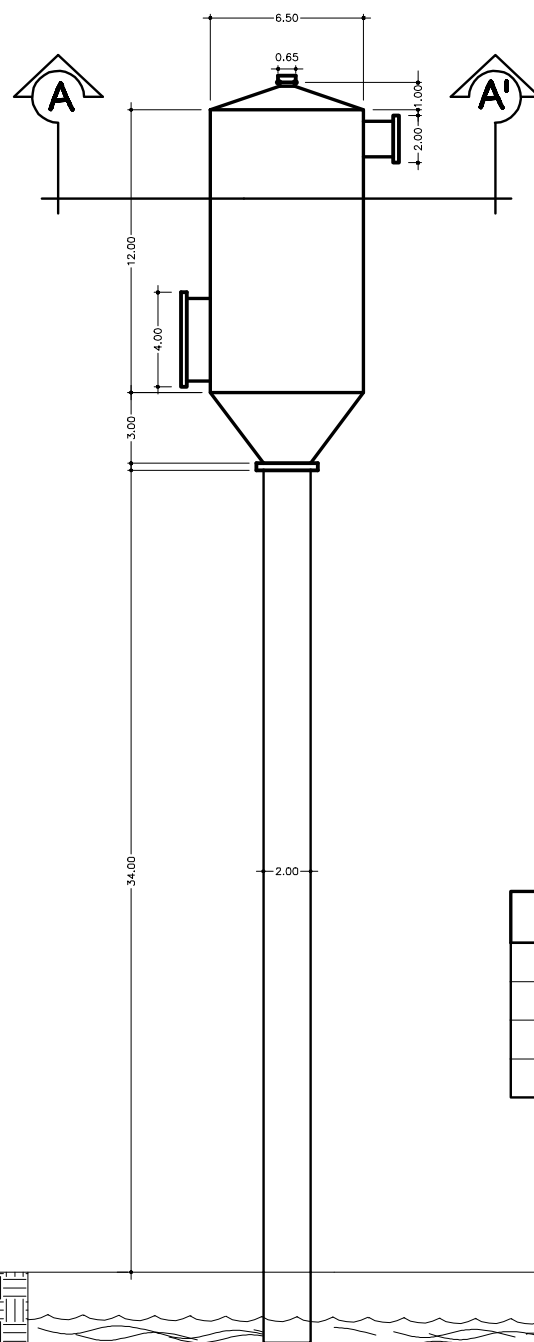
Tabla XIV: Costo del condensador barométrico

Sector	Número	Costo unitario	Costo total
Cuerpo del condensador	1	Q 163 546,60	Q 163 546,60
Pierna Barométrica	1	Q70 476,50	Q70 476,50
Bandeja perforada.	1	Q9 282,00	Q9 282,00
Bridas	4	Q575,00	Q2 300,00
Pernos	75	Q 150,00	Q11 250,00
Tubería auxiliar	6	Q 230,00	Q1 380,00
Subtotal			Q258 235,10
Costo de mano de obra		Q258 235,10 * ,30	Q77 470,50
Costo de transporte		Q258 235,10 * ,50	Q 129 175,55
TOTAL			Q464 823,15

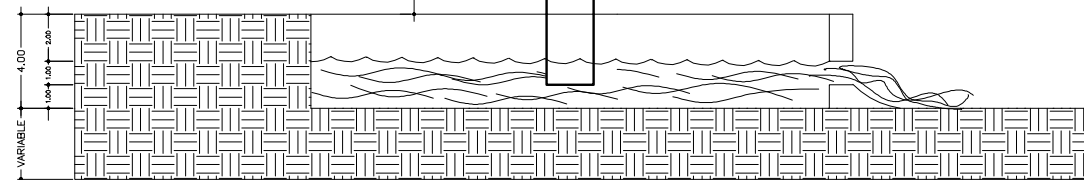
FUENTE: Inciso 3.6

APÉNDICE 3

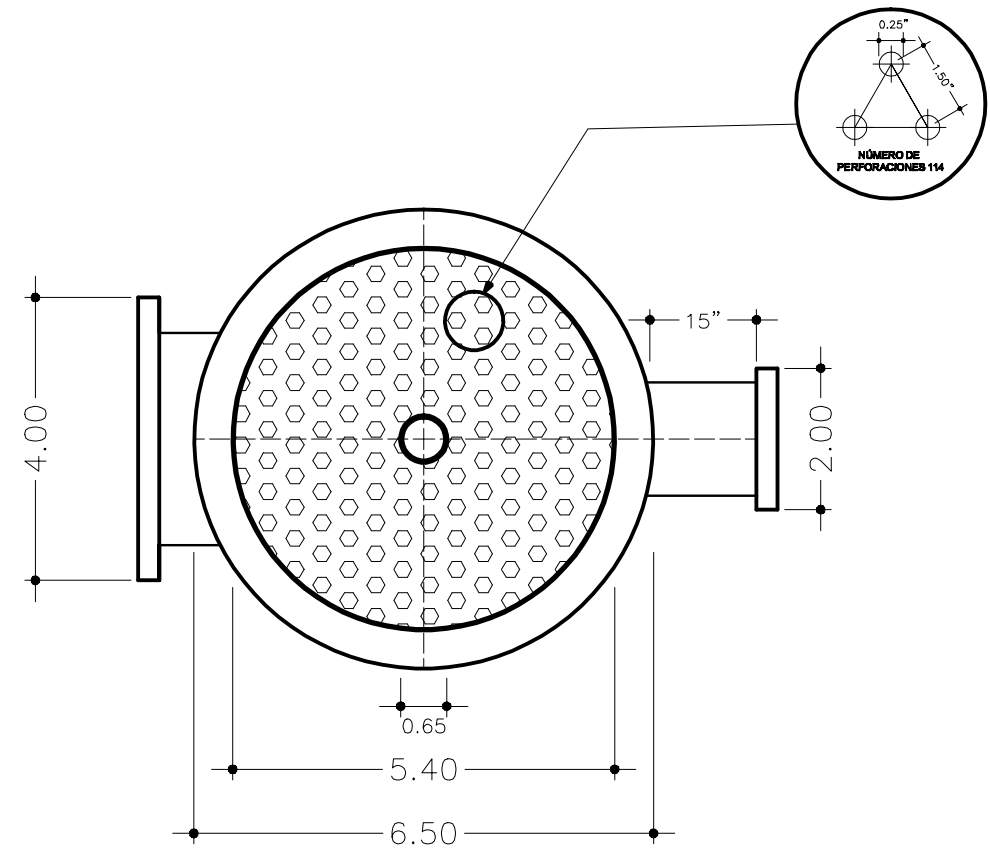
PRESENTACIÓN FINAL DEL CODENSADOR BAROMÉTRICO: PLANOS



MATERIALES		
AREA	MATERIAL	ESPESOR
CUERPO	30412	1/2"
BANDEJA	304LSS	1/2"
PIERNA	ACERO AL CARBON	1/4"



CONDENSADOR BAROMETRICO
ESCALA 1:300



CORTE A - A'
ESCALA 1:100



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

Proyecto: DISEÑO DE CONDENSADOR BAROMETRICO EN UN INGENIO AZUCARERO

Escuela: INGENIERIA QUIMICA

Contenido: VISTA FRONTAL Y CORTE

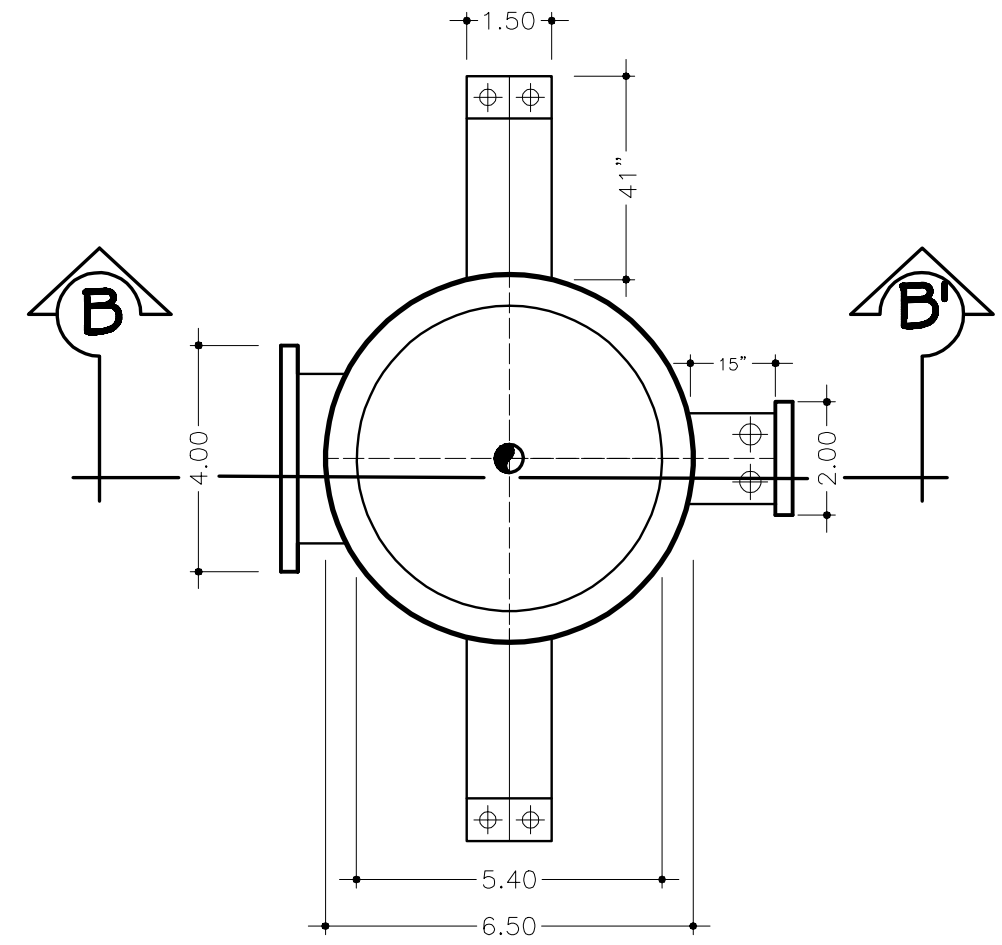
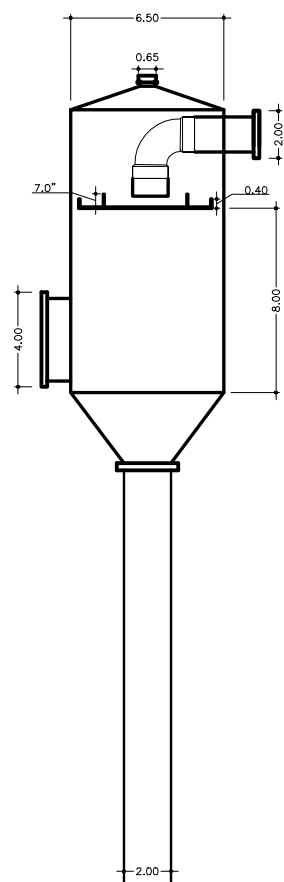
Escala Grafica: _____

Hoja No. De: 4

Elaboró:	Fecha:
KREILY AGUIRRE	ABRIL DE 2010
Calculó:	
KREILY AGUIRRE	
Diseño:	
KREILY AGUIRRE	

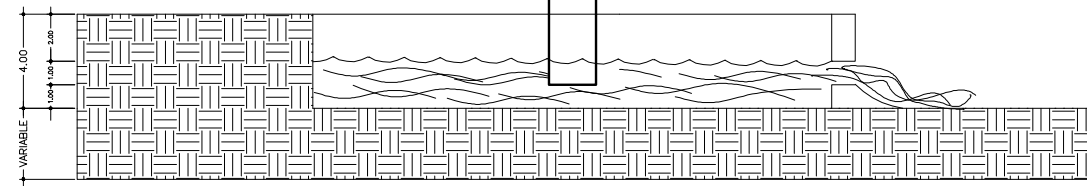
KREILY CARLOTA AGUIRRE CHENCHILLA
ESTUDIANTE DE ING. QUIMICA

ING. ORLANDO POBADAS VALJEEZ
ASESOR DE TESIS

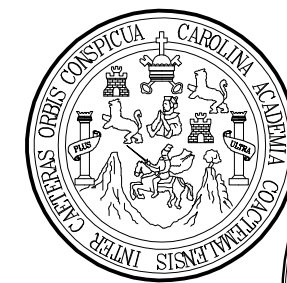


ESPECIFICACIÓN DE BRIDAS Y PERNOS					
BOQUILLA	BRIDAS		PERNOS		
	DIAMETRO NOMINAL (mm)	ESPESOR (mm)	DIAMETRO NOMINAL (mm)	NÚMERO DE HOYOS	TAMAÑO
ENTRADA DE VAPOR	1,000	72	900	25	M50
ENTRADA DE AGUA	880	80	670	20	M39
SALIDA DE INCONDENSABLES	150	28	120	8	M24
SALIDA DE MEZCLA	900	65	675	22	M42

VISTA DE PLANTA
ESCALA 1:125



CORTE B - B'
ESCALA 1:300



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

Proyecto: DISEÑO DE CONDENSADOR BAROMETRICO EN UN INGENIO AZUCARERO

Escuela: INGENIERIA QUIMICA

Curso: PLANTA Y CORTE

Escala Grafica:

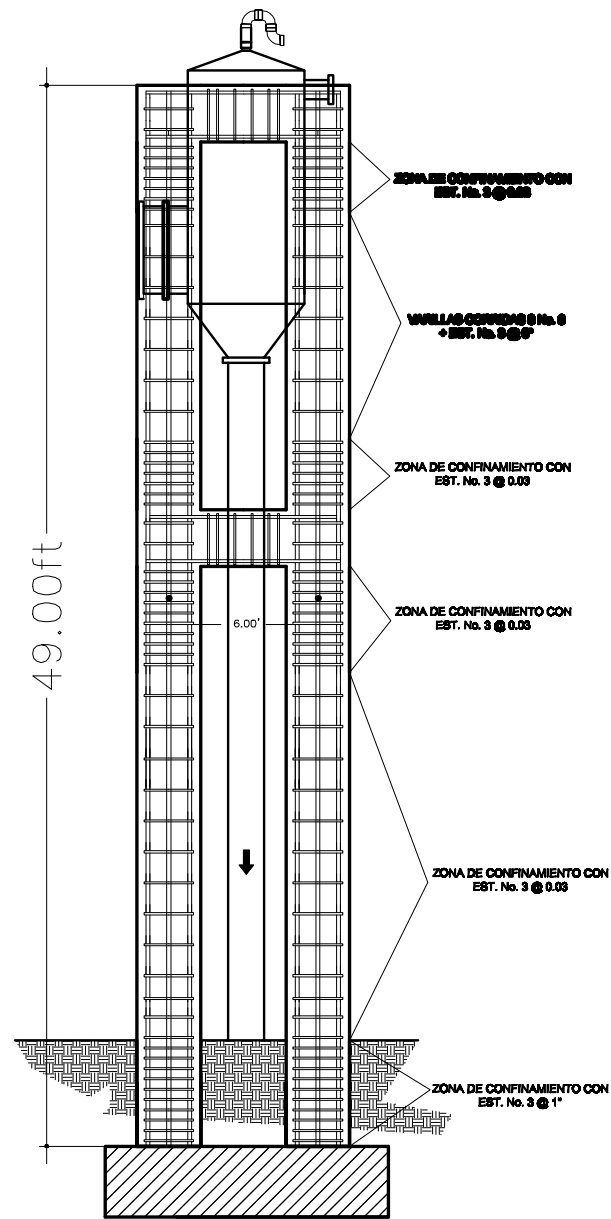
Hoja No. De: 2 / 4

Elaborado: KRIBLY AGUIRRE
Fecha: ABRIL DE 2010

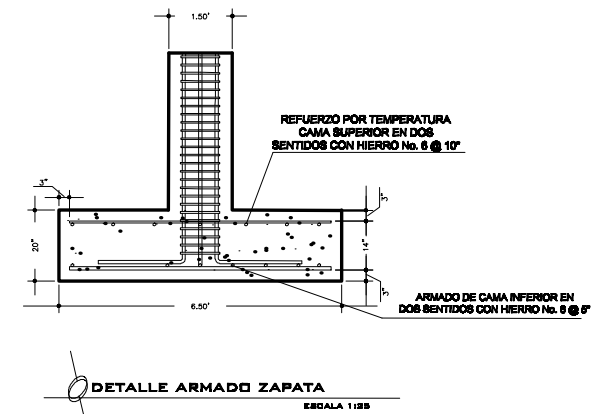
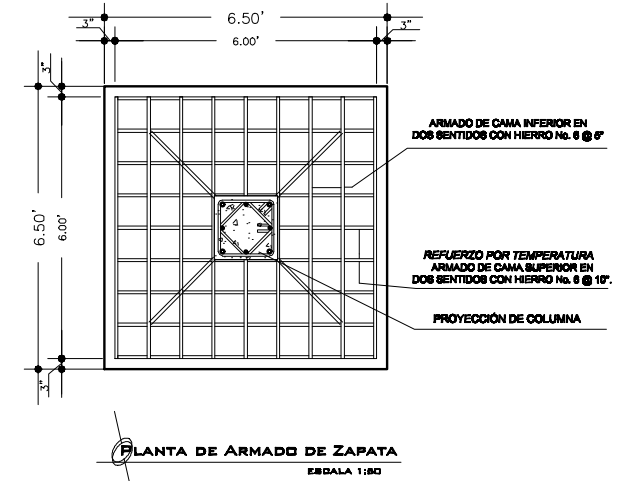
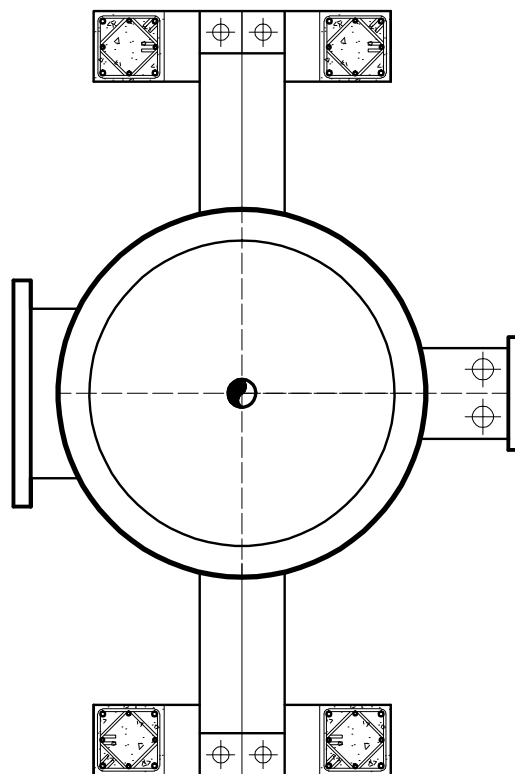
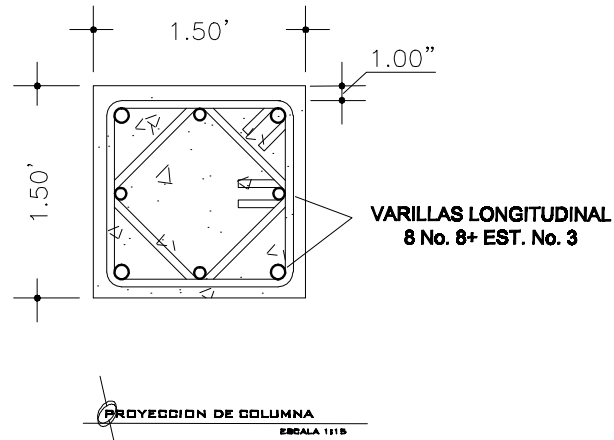
Calculo: KRIBLY AGUIRRE

Diseño: KRIBLY AGUIRRE

Ing. ORLANDO POBADAS VALJES
ASESOR DE TESIS



DETALLE ARMADO COLUMNAS DE APOYO
ESCALA 1:50



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

Proyecto: DISEÑO DE CONDENSADOR BAROMETRICO EN UN INGENIO AZUCARERO

Escuela: INGENIERIA QUIMICA

Curso: DISEÑO ESTRUCTURAL

Escala Grafica: _____

Elaboró:	Fecha:
KREBLY AGUIRRE	ABRIL DE 2010
Calculó:	
KREBLY AGUIRRE	
Diseño:	
KREBLY AGUIRRE	

Hoja No. De: 3 / 4

KREBLY CARLOTA AGUIRRE CHENCHILLA ESTUDIANTE DE ING. QUIMICA

ING. ORLANDO POBADAS VALJUEZ ASESOR DE TESIS

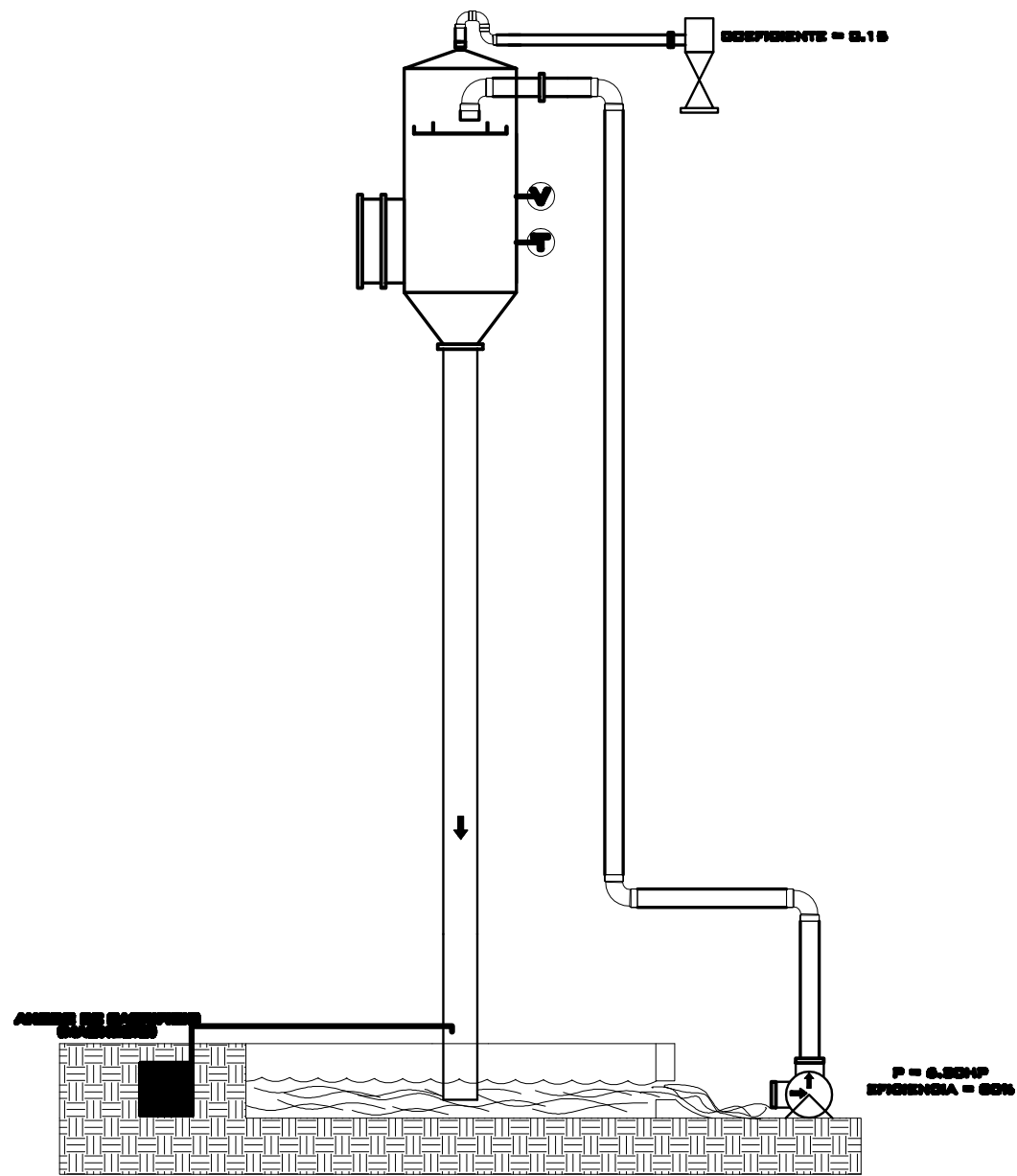
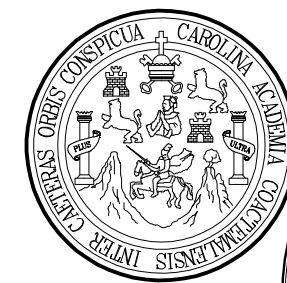


DIAGRAMA DE FLUJO
SIN ESCALA



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

Proyecto: DISEÑO DE CONDENSADOR BAROMETRICO EN UN INGENIO AZUCARERO

Escuela: INGENIERIA QUIMICA

Contenido: DIAGRAMA DE FLUJO

Elaboró:	Fecha:
KRIBLY AGUIRRE	ABRIL DE 2010
Calculó:	
KRIBLY AGUIRRE	
Diseño:	
KRIBLY AGUIRRE	

Escala Gráfica:

Hoja No. De:
4

ABSTRACT

During the development of the present graduation thesis was made an integral design of a condensation equipment that works in series with an evaporation system for a sugar cane processing plant. The designed equipment is an sprayer single tray barometric condenser for which was necessary to use data from an evaporation system to later generate design criteria. At the same time, it was necessary to make a compilation of equations, data, theories and a criterion that allowed to design an adequate equipment.

The theme of the graduation work that is developed in the present document was eminently investigative and has as final result the obtaining of a compilation of diagrams and chart specifications on which can be defined the parts, dimensions, materials, accessories and supplementary equipments that the barometric condenser needs to operate on the evaluated system. That way, at the end we can get to determine the theoretical efficiency of the designed equipment, that is 85.98%. At the same time it was determined that the inversion cost of the equipment, built in Guatemala, is of Q 450, 000.00.