



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

**DISEÑO Y EVALUACIÓN DE UN EVAPORADOR  
CONVENCIONAL PARA UN INGENIO AZUCARERO**

**Edgar Wotzvely Castillo Contreras**

Asesorado por el Ing. Edgar Armando Barrillas Rodas

Guatemala, junio de 2013

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO Y EVALUACIÓN DE UN EVAPORADOR  
CONVENCIONAL PARA UN INGENIO AZUCARERO**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

**EDGAR WOTZVELY CASTILLO CONTRERAS**

ASESORADO POR EL ING. EDGAR ARMANDO BARILLAS RODAS

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO QUÍMICO**

GUATEMALA, JUNIO DE 2013

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paíz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Walter Rafael Véliz Muñoz
VOCAL V	Br. Sergio Alejandro Donis Soto
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO	Ing. Jorge Mario Morales González
EXAMINADOR	Ing. Francisco Aben Rosales Cerezo
EXAMINADOR	Ing. José Eduardo Calderón García
EXAMINADOR	Ing. William Guillermo Alvarez Mejía
SECRETARIO	Ing. Edgar José Aurelio Bravatti Castro

## HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento 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 Y EVALUACIÓN DE UN EVAPORADOR CONVENCIONAL PARA UN INGENIO AZUCARERO

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha 13 de mayo de 2011.

  
Edgar Wotzvely Castillo Contreras

Ciudad de Guatemala, 15 de febrero de 2013.

Ingeniero

VICTOR MANUEL MONZÓN VALDÉZ

DIRECTOR DE LA ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA

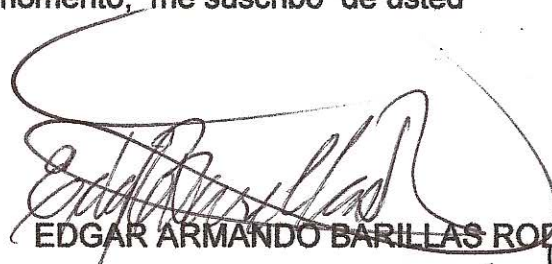
FACULTAD DE INGENIERIA

USAC

Respetable Señor Director:

Me dirijo a usted para informarle que a la presente fecha he revisado el informe final del trabajo de graduación titulado: "DISEÑO Y EVALUACION DE UN EVAPORADOR CONVENCIONAL PARA UN INGENIO AZUCARERO", del estudiante universitario EDGAR WOTZVELY CASTILLO CONTRERAS, con número de carné 197913034, de quien estoy fungiendo como ASESOR. Siendo que los aspectos metodológicos del trabajo en cuestión llenan los requisitos técnicos que ameritan su aprobación, sirva la presente para patentizarlo a efecto de que se autorice el trabajo realizado y se proceda a continuar con los trámites subsiguientes.

Sin más por el momento, me suscribo de usted



EDGAR ARMANDO BARILLAS RODAS

Ing. Químico, colegiado

*Edgar Armando Barillas Rodas*  
Ingeniero Químico  
Colegiado 291



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 del estudiante, **EDGAR WOTZVELY CASTILLO CONTRERAS** titulado: "**DISEÑO Y EVALUACIÓN DE UN EVAPORADOR CONVENCIONAL PARA UN INGENIO AZUCARERO**". Procedé a la autorización del mismo, ya que reúne el rigor, la secuencia, la pertinencia y la coherencia metodológica requerida.



Ing. Víctor Manuel Monzón Valdez  
DIRECTOR  
Escuela de Ingeniería Química

Guatemala, julio 2013

Cc: Archivo  
VMMV/ale

Universidad de San Carlos  
de Guatemala



Facultad de Ingeniería  
Decanato

DTG. 517 .2013

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 Y EVALUACIÓN DE UN EVAPORADOR CONVENCIONAL PARA UN INGENIO AZUCARERO**, presentado por el estudiante universitario **Edgar Wotzvely Castillo Contreras**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

  
Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos  
Decano

Guatemala, 23 de julio de 2013

/gdech



## **ACTO QUE DEDICO A:**

<b>Dios</b>	Por ser la fuerza que me impulsa en mi vida y en mi carrera.
<b>Mis padres</b>	Álvaro Castillo Viana y María Telma Contreras Arana, por ser los mejores padres.
<b>Mi esposa</b>	Liseth Villanueva, por ser una importante influencia en mi carrera y ser la mejor esposa del mundo.
<b>Mis hijos</b>	Álvaro Wotzvely, María Liseth, Karen Marisol, Jacqueline Daniela y Elizabeth Gabriela, la motivación de mi vida.
<b>Mis amigos</b>	Por su apoyo y amistad.
<b>Mis compañeros</b>	Compañeros en el estudio y en el camino de la vida.



## **AGRADECIMIENTOS A:**

<b>Dios</b>	Por permitirme culminar esta etapa de mi vida.
<b>Mis padres</b>	Álvaro Castillo Viana y María Telma Yolanda Contreras Arana, por haberme apoyado siempre.
<b>Mi esposa</b>	Liseth Villanueva, por ser un ejemplo a seguir.
<b>Mis hijos</b>	Álvaro Wotzvely, María Liseth, Karen Marisol, Jacqueline Daniela y Elizabeth Gabriela, por ser comprensivos.
<b>Mis amigos</b>	Por su apoyo y amistad incondicional.
<b>Mis compañeros</b>	Por los momentos compartidos en las aulas.
<b>Facultad de Ingeniería</b>	Por la excelente formación académica brindada.
<b>Universidad de San Carlos de Guatemala</b>	Por darme la conciencia de ser parte de este hermoso país que es Guatemala.

# ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES .....	V
LISTA DE SÍMBOLOS .....	VII
GLOSARIO .....	IX
RESUMEN .....	XIII
OBJETIVOS/HIPÓTESIS .....	XV
INTRODUCCIÓN .....	XVII
1. ANTECEDENTES .....	1
2. MARCO TEÓRICO .....	3
2.1. Evaporación .....	3
2.2. Cálculo del evaporador .....	4
2.2.1. Cálculo del agua a evaporar .....	5
2.2.2. Cálculo de la superficie de intercambio de calor .....	5
2.2.3. Cálculo del coeficiente de transferencia de calor $K$ ..	6
2.2.4. Cálculo de la calandria del evaporador .....	9
2.2.4.1. Número de tubos de la calandria .....	10
2.2.4.2. Diámetro de la calandria .....	12
2.2.5. Cálculo del cuerpo del evaporador .....	13
2.2.6. Cálculo de la cúpula del evaporador .....	14
2.2.7. Cálculo del fondo del evaporador .....	16
2.2.8. Cálculo de la salida y entrada de jugo; y salida de condensados del evaporador .....	18
2.2.9. Cálculo de la entrada y salida de vapor .....	19
2.2.10. Cálculo de la salida de gases incondensables .....	21

2.3.	Programación del montaje del evaporador .....	22
2.4.	Costos.....	24
2.4.1.	Costos fijos.....	24
2.4.2.	Costos variable.....	25
3.	DISEÑO METODOLÓGICO.....	27
3.1.	Variables .....	27
3.2.	Delimitación de campo de estudio.....	28
3.3.	Recursos humanos disponibles.....	28
3.4.	Recursos materiales disponibles .....	29
3.5.	Técnica cuantitativa.....	30
3.6.	Recolección y ordenamiento de la información .....	30
3.7.	Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información .....	30
3.8.	Análisis estadístico.....	31
4.	RESULTADOS .....	35
4.1.	Resultados del diseño y cálculo del evaporador.....	35
4.2.	Materiales necesarios para la construcción del evaporador ...	36
4.3.	Programación de actividades del proyecto del evaporador ...	42
4.4.	Costo de mano de obra.....	49
4.5.	Costo total del proyecto.....	51
4.6.	Procedimiento de arranque del evaporador.....	51
4.7.	Datos de operación de la estación de evaporación del ingenio azucarero.....	53
4.8.	Análisis estadístico.....	54
5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS .....	57

CONCLUSIONES .....	61
RECOMENDACIONES.....	63
BIBLIOGRAFÍA.....	65
APÉNDICE .....	67
ANEXO.....	71



## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1.	Diagrama de un quíntuple efecto.....	2
2.	Diagrama del primer efecto de la estación de evaporación.....	4
3.	Evaporador tipo convencional .....	7
4.	Partes de un evaporador tipo convencional.....	8
5.	Distribución de los tubos en la placa de la calandria.....	11
6.	Cuerpo del evaporador.....	14
7.	Cúpula o separador de arrastres del evaporador.....	15
8.	Fondo del evaporador .....	17
9.	Mampara distribuidora de jugo .....	17
10.	Salida de gases incondensables .....	22

### TABLAS

I.	Resultados del diseño y cálculo del evaporador .....	35
II.	Materiales utilizados en la construcción y montaje del evaporador ....	36
III.	Actividades y tiempos de realización para la construcción y montaje del evaporador .....	43
IV.	Descripción de puestos y salarios .....	50
V.	Datos Brix meladura zafras, 2010-2011 y 2011-2012.....	53



## LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
<b>A</b>	Área de transferencia de calor del evaporador
<b>A<sub>T</sub></b>	Área de transferencia de un tubo de cobre o acero Inoxidable.
<b>B<sub>0</sub><sup>JC</sup></b>	Brix del jugo claro a la entrada del evaporador
<b>B<sub>1</sub><sup>JC</sup></b>	Brix del jugo claro a la salida del evaporador
<b>r</b>	Calor latente del agua para una presión dada en la cámara de jugo del evaporador.
<b>Q</b>	Calor transferido
<b>K</b>	Coefficiente de transmisión de calor
<b>D</b>	Diámetro del tubo a utilizar
<b>d</b>	Diámetro del tubo en metros
<b>d<sub>e</sub></b>	Diámetro exterior de los tubos
<b>ΔV<sub>w</sub></b>	Diferencia de temperatura del vapor saturado y la temperatura del jugo en ebullición.
<b>P</b>	Distancia entre los centros de dos tubos vecinos
<b>α</b>	Factor que toma en cuenta el espacio perdido por los corredores de vapor y el espacio que se pierde alrededor del borde de la calandria y es del orden de 0,98.
<b>W</b>	Flujo de masa del agua a evaporar
<b>p</b>	Flujo de vapor en peso en kilogramos
<b>p<sub>1</sub></b>	Flujo de vapor en peso en kilogramos, más 10% de variación
<b>F</b>	Flujo volumétrico del fluido en metros cúbicos por segundo
<b>gl1</b>	Grados de libertad nominal
<b>gl2</b>	Grados de libertad numéricos



$M_o^V$	Masa de entrada de vapor al evaporador
$M_1^J$	Masa de jugo a la salida del evaporador
$M_o^{JC}$	Masa de jugo de entrada a la evaporación
$M_1^V$	Masa de salida de vapor vegetal del evaporador
$N_T$	Número de tubos de la calandria
$C$	Número de valores nominales
$g$	Peso específico del vapor
$\bar{y}_j$	Promedio de la j-esima columna
$\bar{y}$	Promedio total de todos los datos
$k_e$	Relación entre el área perforada de la placa y el área total de la placa sin tomar en cuenta el espacio perdido.
$K_e$	Relación entre el área perforada y el área total de la placa
$k_i$	Relación entre la sección transversal del paso del jugo en los tubos y el área correspondiente de la placa, en las partes ocupada enteramente por los tubos
$S$	Sección transversal del tubo
$S_i$	Sección transversal total del paso de todos los tubos.
$\Sigma$	Superficie total de la placa
$\beta$	Superficie total de la placa entre tubos
$v_v$	Temperatura del vapor en la calandria, °C
$n$	Total de datos
$n_j$	Total de datos de j-esima columna
$V$	Velocidad de fluido en m/s
$q$	Volumen de vapor por segundo

## GLOSARIO

<b>Azúcar</b>	Producto obtenido de la caña de azúcar después de haber sido procesada en un ingenio azucarero.
<b>Bagazo</b>	Es el residuo de la caña prensada en un molino o en un tándem de molinos y que se utiliza en las calderas como combustible.
<b>Brix</b>	Es el porcentaje en peso de los sólidos en una solución pura de sacarosa. Por acuerdo general se acepta que el Brix representa los sólidos aparentes en una solución azucarada cuando se determina por el hidrómetro Brix u otra medida de densidad convertida a esta escala.
<b>Calor latente</b>	Es la energía requerida por una sustancia para cambiar de fase, de sólido a líquido (calor de fusión) o de líquido a gaseoso (calor de vaporización). Se debe tener en cuenta que esta energía en forma de calor se invierte para el cambio de fase y no para un aumento de la temperatura.
<b>Estación de evaporación</b>	Es el conjunto de evaporadores que forman la etapa de evaporación en el proceso de fabricación del azúcar a partir de la caña de azúcar.

<b>Imbibición</b>	Es el proceso en el cual se aplica agua o jugo a un bagazo para mejorar la extracción de jugo en el molino siguiente.
<b>Jugo Claro</b>	Es el jugo producto de la etapa de clarificación y que se alimenta a la estación de evaporación.
<b>Meladura</b>	Es el jugo o guarapo concentrado proveniente de los evaporadores a un Brix aproximado de 60 a 65 grados (1 288,73 a 1 318,66 kg/m <sup>3</sup> ).
<b>Pol</b>	Valor obtenido por la polarización directa en un sacarímetro de una solución de peso normal. Para los cálculos se toma como si fuera una sustancia real y sustituye a la denominación sacarosa.
<b>Rendimiento</b>	Cantidad de sacarosa obtenida por cada tonelada de caña molida en un ingenio azucarero.
<b>Sacarosa</b>	Disacárido o hidrato de carbono que se expresa con la fórmula molecular $C_{12}H_{22}O_{11}$ que es el azúcar común que se consume en los hogares.
<b>Tándem</b>	Es el conjunto de molinos puestos en serie para lograr la mejor extracción de la sacarosa presente en la caña de azúcar.

**Vapor de escape**

Es el vapor saliente de las turbinas que mueve los turbogeneradores, oscila de 20 psi (137,90 kPa) a 25 psi (172,37 kPa).



## RESUMEN

El objetivo principal del presente trabajo fue mejorar la eficiencia de la operación de extracción de sacarosa construyendo un evaporador para aumentar el área de transferencia de calor de esta etapa, con el fin de agregar el 5 % más de agua de imbibición en la etapa de extracción de azúcar (molinos). Actualmente se agrega el 20 % en caña.

El ingenio azucarero cuenta con 14 evaporadores de una capacidad de 30 600 pie cuadrado (2 844,29 metros cuadrados) de superficie de transferencia de calor cada uno, en el primer efecto, por lo que se revisó si un evaporador de esta superficie cumplía con los requerimientos del proceso, con la estandarización del equipo y con el ordenamiento de los espacios en la planta de producción.

Este trabajo se realizó en un ingenio azucarero, el cual proporciono todos los recursos necesarios para la realización de este proyecto; materiales, mano de obra, información del laboratorio, información de costos, a través de los Departamentos de Fábrica, Laboratorio, Compras, Bodega de Materiales, Módulo de Personal, Oficina de Presupuestos y Personal Operativo, principalmente, supervisor, soldadores, mecánicos, eléctricos, instrumentistas y ayudantes.

Con los recursos que proporciono el ingenio se realizaron las siguientes actividades: cálculo de las dimensiones del evaporador, materiales necesarios, mano de obra, costos del proyecto, el diagrama de la ruta crítica, montaje del

evaporador, puesta en marcha y validación del equipo por medio de análisis estadístico.

El evaporador diseñado y evaluado tiene las siguientes dimensiones principales: diámetro del evaporador 16 pies 2 pulgadas (4,93 metros), diámetro del tubo central 2 pies (0,61 metros), altura del cuerpo 16,5 pies (5,03 metros), área de intercambio de calor 30 600 pies cuadrados (2 844,29 metros cuadrados), 7 930 tubos de acero inoxidable de 10 pies (3,05 metros) de largo y 1,5 pulgadas (0,0381 metros) de diámetro exterior, el coeficiente de transferencia de calor calculado es de 3 570.62 w/m<sup>2</sup> k y el costo total del proyecto fue de Q. 6 898 848,33, con un tiempo de realización de 180 días.

La puesta en marcha de este equipo se realizó en la zafra 2011-2012. La validación del proyecto se hizo a partir del brix de la Meladura, tomado datos de la zafra anterior y comparándolos con los datos obtenidos en la zafra 2011-2012, se utilizó el método de Análisis de Varianza (ANOVA). El criterio de aprobación fue el siguiente: Si no existe estadísticamente diferencia significativa entre los datos de las zafras indicadas el evaporador es el adecuado. Si estadísticamente existe diferencia significativa entre los datos de brix de las zafras indicadas el evaporador no es el indicado. Después de realizado el Análisis de Varianza el valor de  $\alpha$  dio 0,52, esto confirma la hipótesis nula, y confirma que el evaporador diseñado es el adecuado para este proceso.

# OBJETIVOS

## General

Diseñar y evaluar un evaporador tipo convencional, para ser utilizado en la eliminación del 5 % de agua al aumentar la imbibición del 20 % al 25 % en la etapa de extracción de sacarosa.

## Específicos

1. Calcular un evaporador tipo convencional para aumentar un 5 % el agua de imbibición en molinos, tomando en cuenta la estandarización del equipo y el espacio existente en el edificio de la estación de evaporación de un ingenio azucarero.
2. Determinar los materiales a utilizar en la construcción del evaporador a construir y su costo.
3. Obtener el costo del proyecto de ampliación de la etapa de evaporación al construir un evaporador de 30 600 pies cuadrados (2 844,29 metros cuadrados) de superficie de transferencia de calor.



## **HIPÓTESIS**

La estación de evaporación es capaz de separar el agua adicional que se añadirá en la imbibición de molinos, si cuenta con los 30 600 pies cuadrados (2 844,29 metros cuadrados) de superficie de transferencia de calor que se agregarán con el evaporador calculado, montado y puesto en marcha.

### **Hipótesis nula**

No existe diferencia significativa en el valor de la medición de los grados brix de la meladura a la salida de la etapa de evaporación entre las zafras 2010-2011 y 2011-2012.

### **Hipótesis alternativa**

Existe diferencia significativa en el valor de la medición de los grados brix de la meladura a la salida de la etapa de evaporación entre las zafras 2010-2011 y 2011-2012.

## INTRODUCCIÓN

La eficiencia en las plantas industriales toma un papel relevante, para que puedan competir en el mercado globalizado que existe actualmente, la industria del azúcar nacional no escapa a ello porque la mayor parte de su producción es para la exportación.

El rendimiento de un ingenio azucarero se mide principalmente por la cantidad de sacarosa que extrae de la caña de azúcar, la etapa que realiza esta operación es la de molinos. Aquí se agrega agua para poder dejar el bagazo de la caña con la menor cantidad de sacarosa posible, en la zafra 2010-2011 el valor de sacarosa en bagazo fue de 2,10 % con 20 % en caña, de agua de imbibición y para la zafra 2011-2012 se desea bajar a 1,95 % con 25 % de imbibición, esto hace necesario ampliar la etapa de evaporación para poder eliminar el agua extra que se agregara al aumentar de 20 % a 25 % el agua en molinos. El valor promedio de la industria azucarera es de 1,82 % pol en bagazo y de 25,32 % en caña de agua de imbibición. (Ver anexo 4).

En este trabajo se tomó el problema de aumentar el área de intercambio de calor en la etapa de evaporación aplicando la estandarización del equipo y el ordenamiento de los espacios en la fábrica, por lo que se comprobó que un evaporador de 30 600 pies cuadrados (2 844,29 metros cuadrados) de superficie de transferencia de calor después de que se calcularon las dimensiones del aparato, la programación de las actividades, los materiales, el personal y los costos de este proyecto cumple con los requerimientos del proceso. Al final se puso en marcha y se evaluó el equipo por medio de la

comparación estadística (Método ANOVA) de las mediciones del brix de la meladura en las zafras 2010- 2011 y 2011-2012.

Todos los recursos materiales, laboratorio, información y mano de obra para la realización de este proyecto fueron proporcionados por el Ingenio Azucarero.

## 1. ANTECEDENTES

En 1992 el ingenio azucarero contaba con 8 evaporadores convencionales en la fábrica, con capacidades de 6 000 (557,704 metros cuadrados) a 10 000 pies cuadrados (929,506 metros cuadrados) de superficie de transferencia de calor, con la visión de ser la mejor empresa en Latinoamérica se ampliaron todas las etapas del Ingenio para poder aumentar su capacidad de molienda, la etapa de evaporación por consiguiente se amplió hasta llegar a 34 evaporadores convencionales de diferentes capacidades, que van de los 6 000 (557,704 metros cuadrados) hasta los 40 000 pies cuadrados (3 718,025 metros cuadrados) de superficie de intercambio de calor. El ingenio cuenta con 14 evaporadores de 30 600 pies cuadrados (2 844,29 metros cuadrados) de intercambio de calor cada uno, estos tienen un diámetro de 16,167 pies (4,93 metros) y una altura del cuerpo de 16,5 pies (5,03 metros), el separador de arrastres mide 6 pies (1,83 metros) de altura, estos son los evaporadores más recientes en ser montados y están en un área nueva del edificio. Es de hacer notar que todos los evaporadores han sido construidos por personal operativo del ingenio y dirigidos por ingenieros guatemaltecos.

La etapa de evaporación ha sido ampliada específicamente por dos razones, la primera es para aumentar el ratio de molida diaria y la segunda para lograr agregar agua de imbibición en molinos para extraer la mayor cantidad de sacarosa del bagazo, el agua de imbibición debe estar idealmente en 25 %, aunque se sacrifica bajando hasta 20 % para poder moler más caña por día.

En la construcción de evaporadores las actividades más críticas son, el suministro de materiales porque se tienen que importar, el barrenado de los espejos o bases para colocar los tubos de la calandria, esta actividad toma un tiempo de 40 días, porque a cada agujero hay que pasarle 2 brocas, una de guía de 1 pulgada (0,0254 metros) de diámetro y la broca de 1 17/32 pulgadas (0,0389 metros) para llegar al diámetro del tubo y este se pueda meter para expandirlo, la medida de los tubos de los evaporadores se estandarizo a 1 ½ pulgadas (0,0381 metros) de diámetro exterior.

Todas estas actividades son dirigidas por el ingeniero químico y juegan un papel importante dos cosas, su capacidad de cálculo y su experiencia.

Con la planificación de las ampliaciones del Ingenio se estandarizo el tamaño de los evaporadores a 30,600 pies cuadrados (4,93 metros cuadrados) de superficie de transferencia de calor cada uno, en total son 14 evaporadores, también se tiene equipo para realizar los montajes, tales como: 2 grúas de 60 ton (58,54 Tm), roladora de lámina hasta 1 pulgada (0,0254 metros) de grosor, montacargas de 5 toneladas (4,88 Tm), cargadores frontales de 10 ton (9,76 Tm), cortadora de plasma para acero inoxidable, equipo de corte oxiacetilénico y equipos de soldadura eléctrica, todo lo necesario para los montajes que se realizaron.

## 2. MARCO TEÓRICO

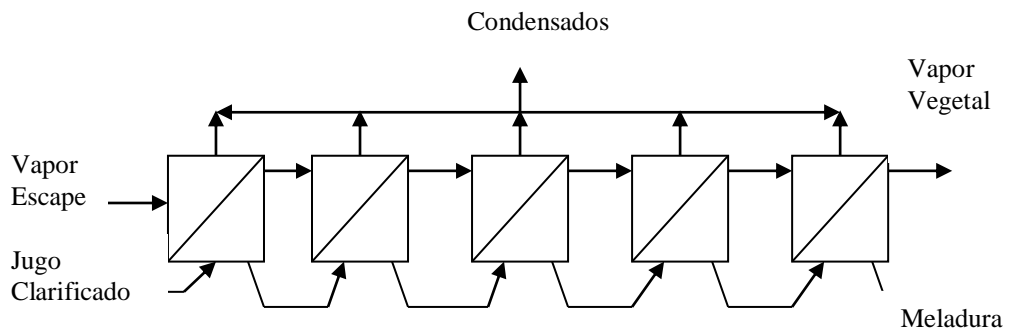
### 2.1. Evaporación

El objetivo de la etapa de evaporación de un ingenio azucarero es eliminar el agua presente en el jugo de la caña y llevarlo a una concentración adecuada, en la cual se pueda manejar el jugo, se preserve la sacarosa sin cristalizar y sea adecuada para la etapa siguiente del proceso.

“La concentración recomendada para el producto obtenido de la etapa de evaporación (Meladura) es de  $60^0 - 70^0$  Brix”<sup>1</sup> (1 288,73 – 1 349,56 kg/m<sup>3</sup>).

La estación de evaporación está dividida en varias partes llamados efectos, generalmente en los ingenios azucareros se trabaja con 5 efectos o sea un quintuple efecto.

Figura 1. Diagrama de un quintuple efecto



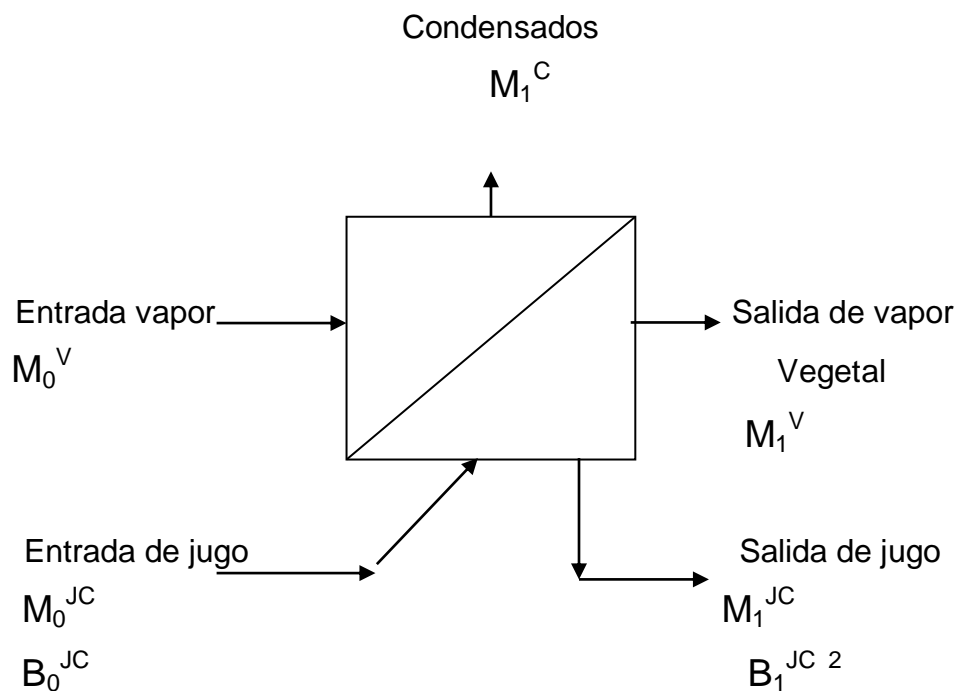
Fuente: elaboración propia.

<sup>1</sup> HUGOT, Emile. Manual para Ingenieros Azucareros. 339 - 383 p.

## 2.2. Cálculo del evaporador

El evaporador calculado se instaló en el primer efecto de la estación de evaporación, como primer paso se realizó el balance de materiales en este efecto para determinar la cantidad de agua a evaporar. A continuación se muestra el diagrama de flujo del efecto para señalar las variables que intervinieron.

Figura 2. Diagrama del primer efecto de la estación de evaporación



Fuente: DE ARMAS, Mario. Modulación y simulación de procesos con un enfoque energético en el área de evaporación y calefacción. 1 – 19 p.

<sup>2</sup> DE ARMAS, Mario. Modulación y simulación de procesos con un enfoque energético en el área de evaporación y calefacción. 1 – 19 p.

### 2.2.1. Cálculo del agua a evaporar

La cantidad de agua que se evapora se determinó al hacer el balance de sólidos en la cámara de evaporación.

$$M_0^{JC} * B_0^{JC} = M_1^{JC} * B_1^{JC} \quad (1)$$

Despejando  $M_1^{JC}$

$$M_1^{JC} = \frac{B_0^{JC} * M_0^{JC}}{B_1^{JC}} \quad (2)$$

Por diferencia se obtiene que:

$$\text{Agua evaporada} = M_0^{JC} - M_1^{JC} \quad (3)$$

### 2.2.2. Cálculo de la superficie de intercambio de calor

“Para una cantidad  $Q$  de calor transferido, un coeficiente de transferencia de calor  $K$  y una diferencia entre la temperatura de saturación del vapor en la calandria y el jugo en ebullición de  $\Delta v_W$  se obtuvo la superficie de transferencia de calor  $A$  del evaporador.”<sup>4</sup>

$$A = \frac{Q}{K \cdot \Delta v_W} \quad (4)$$

<sup>3</sup> DE ARMAS, Mario. Modulación y simulación de procesos con un enfoque energético en el área de evaporación y calefacción. 1 – 19 p.

<sup>4</sup> BARTENS, Albert. Manual de energía para fábricas de azúcar. 91 – 127, 848 p.



El calor que se transfirió  $Q$  es entonces:

$$Q = W \cdot r \quad (5)$$

En donde:

$W$  = Flujo de masa del agua que se evapora

$r$  = Calor latente del vapor de agua para una presión dada  
en la cámara de jugo del evaporador

### **2.2.3. Cálculo del coeficiente de transferencia de calor $K$**

En la industria azucarera de caña se utiliza especialmente la expresión:

$$K = 0,613 (100 - B_1^{JC}) (v_v - 54) [W / (m^2 \cdot K)]^5 \quad (6)$$

En donde:

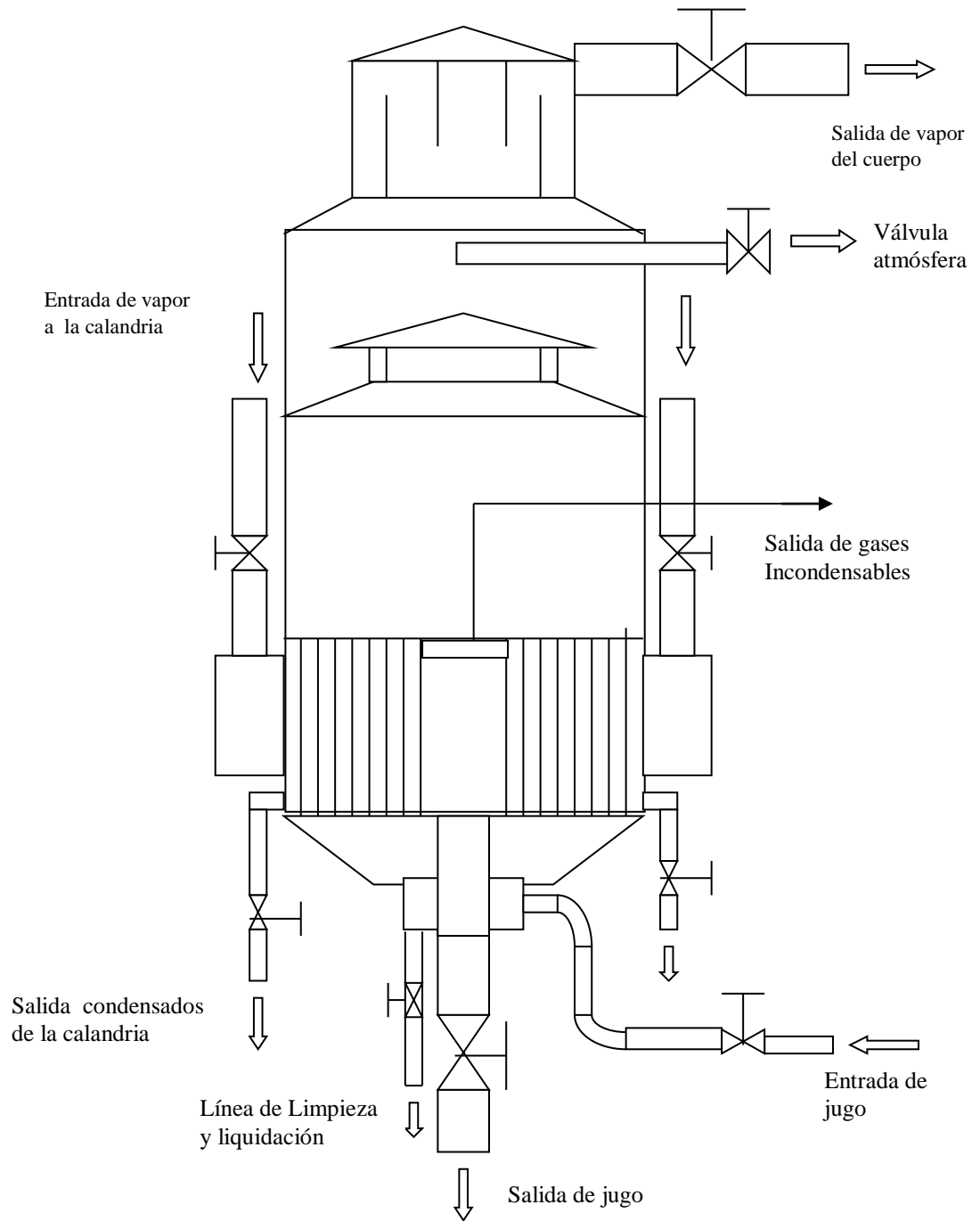
$B_1^{JC}$  = Concentración a la salida del evaporador en % de  
materia seca

$v_v$  = Temperatura del vapor en la calandria, °C

---

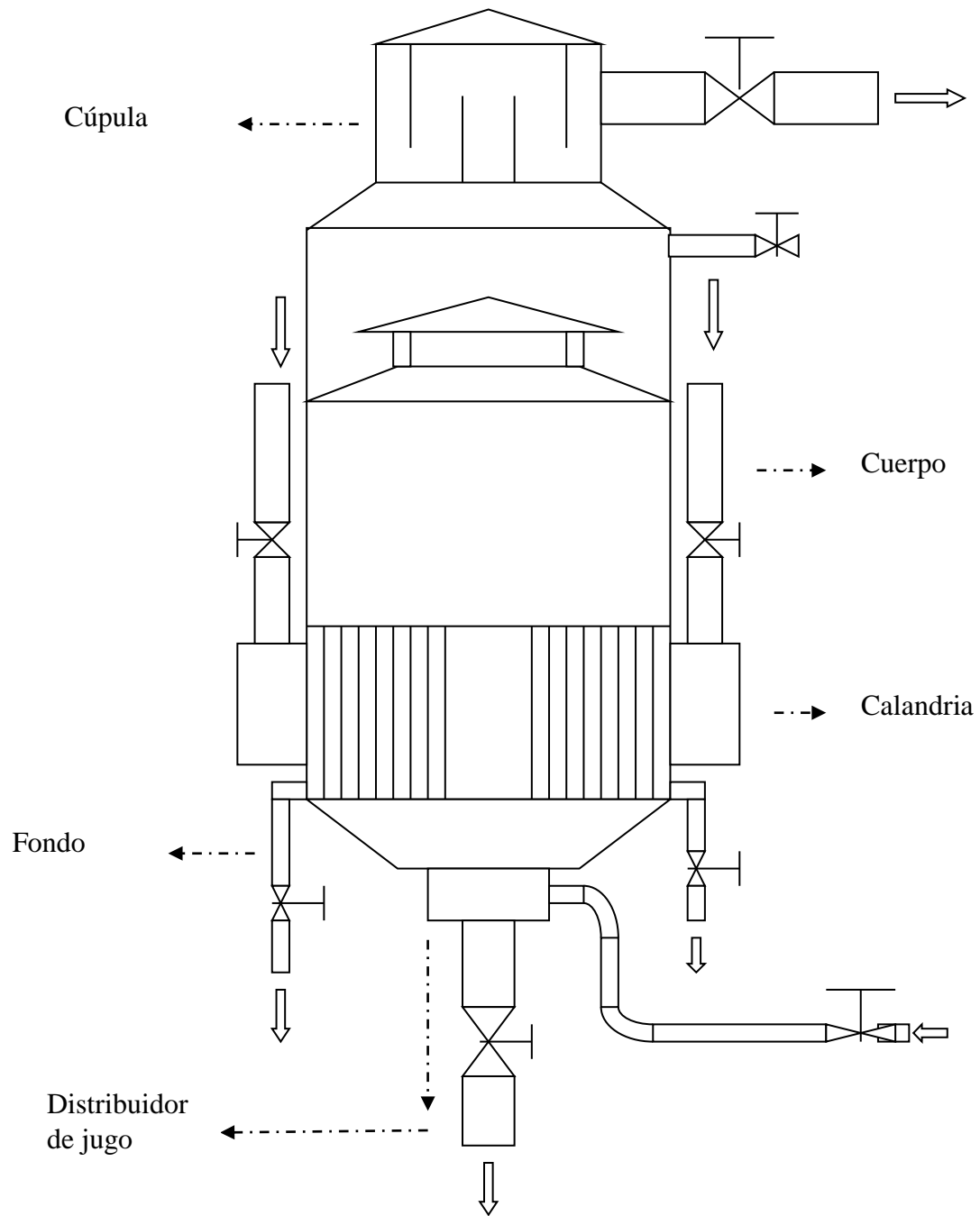
<sup>5</sup> BARTENS, Albert. Manual de energía para fábricas de azúcar. 91 – 127, 848 p.

Figura 3. **Evaporador tipo convencional**



Fuente: elaboración propia con programa Word 2010.

Figura 4. **Partes de un evaporador tipo convencional**



Fuente: elaboración propia con programa Word 2010.

#### **2.2.4. Cálculo de la calandria del evaporador**

La calandria es la parte del evaporador en donde ocurre la transferencia de calor, y está compuesta por tubos de cobre o acero inoxidable.

El jugo es transportado por el interior de los tubos y el vapor va por afuera de ellos, sirviendo la pared de estos como la superficie de transferencia de calor y de división entre el jugo y el vapor para que no sea posible la mezcla entre ellos.

Los tubos están soportados por dos placas de metal que tienen agujeros con el diámetro exterior de los tubos, estos van colocados en los agujeros y para fijarlos se utiliza el método de expandirlos a presión para que queden fijos en las placas de metal llamadas espejos, el nombre de espejos se debe a que las placas de metal una es la imagen de la otra en la distribución de los agujeros.

El jugo entra abajo del evaporador y sube por los tubos para que ocurra la transferencia de calor del vapor hacia el jugo, para continuar, el jugo sale por el tubo central de la calandria que está conectado hasta afuera del evaporador. El diámetro del tubo central debe ser  $1/8$  del diámetro de la calandria.

El vapor entra por dos lados de la calandria en la parte superior y al dar calor al jugo se condensa, este condensado sale por la parte de abajo a través de las cajas colectoras de condensados.

A continuación se presentan las relaciones en que se basaron los cálculos para determinar las dimensiones y distribución de cada una de las partes de la calandria.

#### 2.2.4.1. Número de tubos de la calandria

La elección del diámetro de los tubos no es de vital importancia en fábricas ya establecidas, se utilizó el diámetro estándar para todos los evaporadores, en este caso el diámetro exterior estándar es de 1,5 pulgadas (0,0381 metros). El largo de los tubos del primer efecto es de 10 pies (3,05 metros), siendo estas dimensiones las que se utilizaron en el evaporador nuevo.

El número de tubos  $N_T$ , viene dado por la siguiente relación:

$$N_T = A/A_T \quad (7)$$

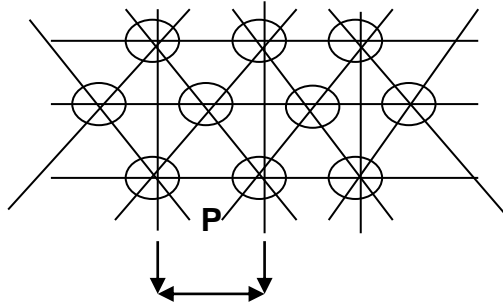
Tomando en cuenta que:

$A$  = Área de transferencia de calor del evaporador

$A_T$  = Área de transferencia de un tubo de cobre

Los tubos se colocaron en una distribución en forma de rombos sobre la placa de la calandria, esta disposición permite colocar la mayor cantidad de tubos por unidad de superficie de la placa y con una misma distancia entre ellos. (Ver figura 5).

Figura 5. **Distribución de los tubos en la placa de la Calandria**<sup>6</sup>



Fuente: HUGOT, Emile. Manual para Ingenieros Azucareros. 339 - 383 p.

“En esta forma los tubos quedaron alineados siguiendo tres direcciones diferentes, a  $120^{\circ}$  los unos de los otros. A este sistema se le llama “tresbolillo”. Para encontrar la distancia **P** entre los centros de los tubos, Hugot propone la siguiente relación:”<sup>7</sup>

$$P = 0,952 d_e / (K_e)^{1/2} \quad (8)$$

En donde:

**P** = Distancia entre los centros de dos tubos vecinos

$D_e$  = Diámetro exterior de los tubos

$K_e$  = Relación entre el área perforada y el área total de la placa.

La relación  $K_e$  varía entre 0,45 y 0,55 en los evaporadores modernos, si se le da un valor de 0,50 a  $K_e$  se tiene que:

<sup>6</sup> HUGOT, Emile. Manual para Ingenieros Azucareros. 339 - 383 p.

<sup>7</sup> Ibid.

$$P = 1,35 d_e \quad (9)$$

#### 2.2.4.2. Diámetro de la calandria

El diámetro de la calandria se determinó a partir de la siguiente ecuación:

$$S_i = k_i \alpha \beta \Sigma^8 \quad (10)$$

En donde:

$S_i$  = sección transversal total del paso de todos los tubos

$k_i$  = Relación entre la sección transversal del paso del jugo en los tubos y área correspondiente de la placa, en las partes ocupadas enteramente por los tubos

$\alpha$  = Factor que toma en cuenta el espacio perdido por los corredores de vapor y el espacio que se pierde alrededor del borde de la calandria y tiene un valor de 0,98.

$\beta$  = Factor que depende del tubo central

$\Sigma$  = Superficie total de la placa

Se tiene que:

$$k_i = K_e S_i / S_e \quad (11)$$

La expresión  $S_i / S_e$  es la relación entre el diámetro interior y el diámetro exterior del tubo de cobre o acero inoxidable  $K_e$  varía entre 0,45 y 0,55.

---

<sup>8</sup> HUGOT, Emile. Manual para Ingenieros Azucareros. 339 - 383 p.

A partir de la ecuación número 11, se despeja la superficie total de la placa ( $\Sigma$ ), obteniéndose la siguiente ecuación:

$$\Sigma = S_i / k_i \alpha \beta \quad (12)$$

También se sabe que la superficie de un círculo es:

$$\Sigma = \pi D^2 / 4 \quad (13)$$

Sustituyendo la ecuación número 12, en la ecuación número 13, se obtuvo el diámetro de la calandria:

$$D = (4S_i / \pi k_i \alpha \beta)^{1/2} \quad (14)$$

### **2.2.5. Cálculo del cuerpo del evaporador**

El cuerpo del evaporador consiste en un cilindro vertical montado sobre la calandria, lleva una mampara cónica que tiene como objetivo detener las gotas del líquido que pueda arrastrar el vapor del jugo.

Los cuerpos de los evaporadores se construyen de lámina de hierro negro de 5/8" (0,0159 metros) de grosor y en la parte baja del cuerpo, cerca del espejo superior se puso un cilindro de acero inoxidable para protegerlo de la limpieza química, y hace que los cuerpos sean fuertes, livianos y de un costo aceptable.

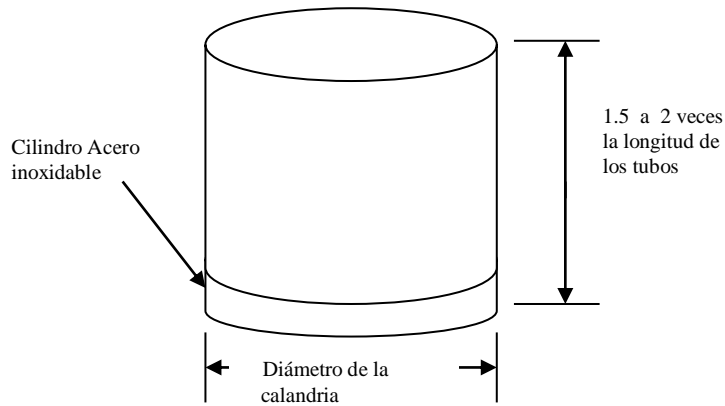
“La altura del cuerpo se recomienda que sea de 1,5 a 2 veces la longitud de los tubos.”<sup>9</sup>

---

<sup>9</sup> CHEN, James. Manual del azúcar de caña. 1220,1127 p.



Figura 6. **Cuerpo del evaporador**



Fuente: elaboración propia con programa Word 2010.

El diámetro del cuerpo depende del diámetro de la calandria, está dado por el número de tubos, la distribución de los tubos, el flujo de vapor y el tubo central.

### 2.2.6. **Cálculo de la cúpula del evaporador**

La cúpula del evaporador es también llamado separador de arrastres, esto se debe a que su función es detener pequeñas gotas o burbujas de jugo que se forman durante la ebullición y se proyectan hacia arriba siendo arrastradas por el vapor y que luego contaminan el agua condensada en el siguiente efecto, esta agua se utiliza como agua caliente para calderas.

“Las proporciones más adecuadas para los separadores son las siguientes.”<sup>10</sup>

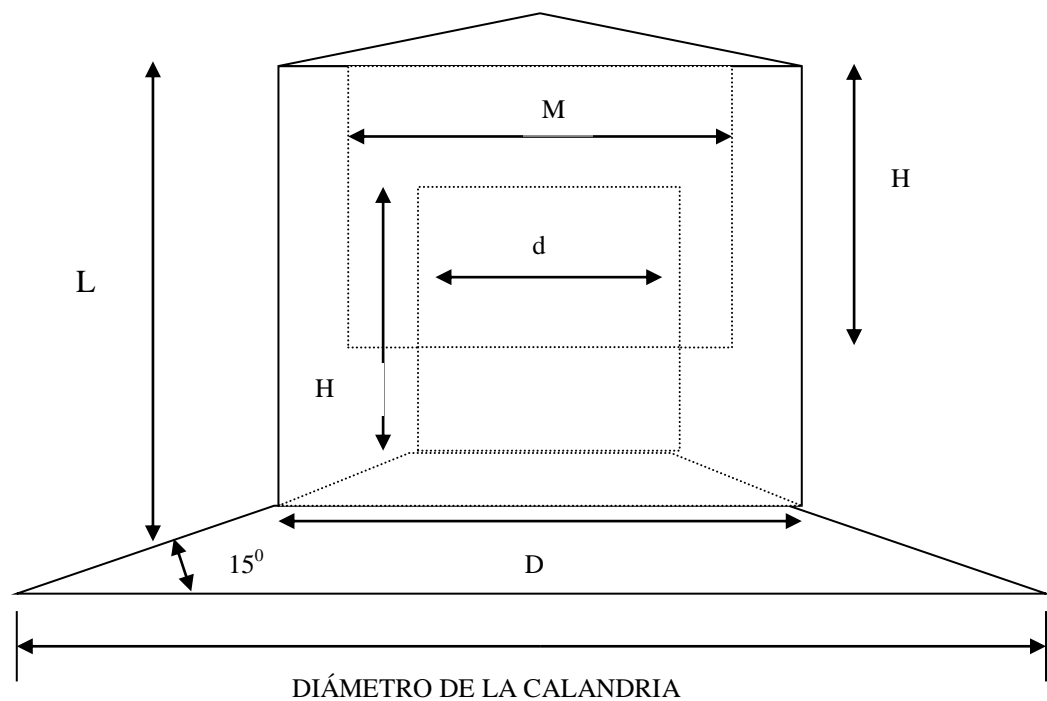
---

<sup>10</sup> CHEN, James. Manual del azúcar de caña. 1220, 1127 p.

$d = 1,00$   
 $D = 2,08$   
 $M = 1,67$   
 $H = 0,84$   
 $L = 1,00$

Se calculó el diámetro  $d$  con valor equivalente igual a 1, a partir del cual se determinaron las demás dimensiones del separador de arrastres o cúpula.

Figura 7. **Cúpula del evaporador**



Fuente: elaboración propia con programa Word 2010.

### 2.2.7. Cálculo del fondo del evaporador

El fondo del evaporador es la tapadera inferior del cuerpo, sirve para retener el jugo contenido por el evaporador y a él está conectada la entrada de jugo por medio de un distribuidor (figura 8) que reparte el jugo de manera uniforme a todos los tubos de la calandria, también está conectada la salida del jugo que viene del tubo central de la calandria.

“El fondo del evaporador es un cono truncado, con un ángulo de  $15^{\circ}$ , que tiene como diámetro mayor, el diámetro de la calandria y como diámetro menor el diámetro del distribuidor de jugo.

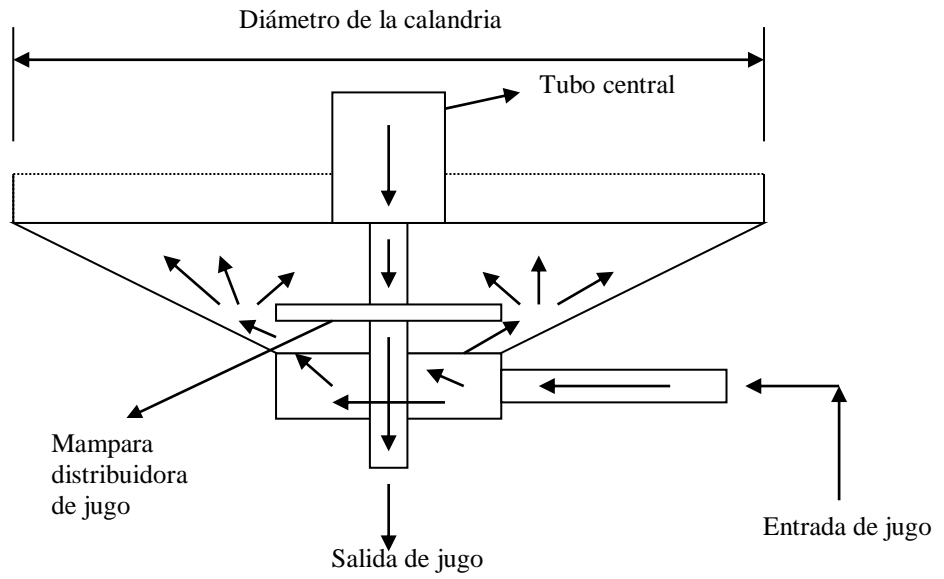
La medida del diámetro del fondo es igual a la calandria, y el distribuidor de jugo es  $1/8$  del diámetro de esta.”<sup>11</sup>

Las medidas del deflector de jugo son: diámetro interior es igual al diámetro del tubo de salida de jugo, y el diámetro exterior es 1,20 veces el diámetro del distribuidor de jugo.

---

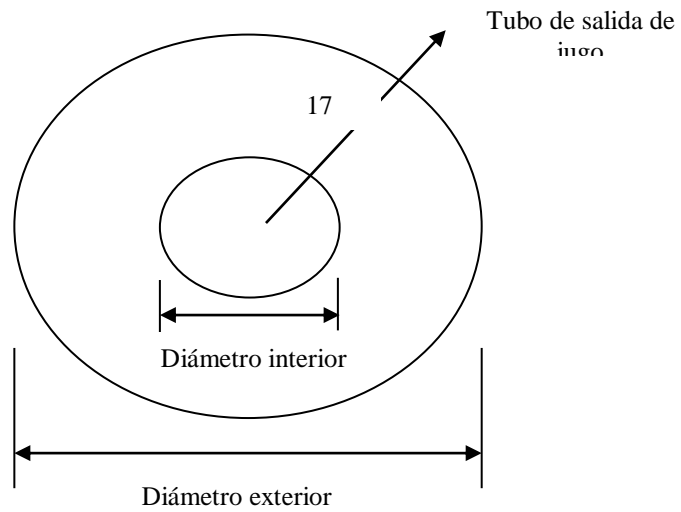
<sup>11</sup> HUGOT, Emile. Manual para Ingenieros Azucareros. 339 - 383 p.

Figura 8. Fondo del evaporador



Fuente: elaboración propia con programa Word 2010.

Figura 9. Mampara distribuidora de jugo



Fuente: elaboración propia con programa Word 2010.

### 2.2.8. Cálculo de la salida y entrada de jugo; y salida de condensados del evaporador

El flujo del jugo en el evaporador es de la siguiente forma: El jugo entra por la parte inferior del evaporador, pasa por la mampara del distribuidor, esto hace que el jugo se distribuya de manera uniforme en toda el área transversal de la calandria y suba por cada uno de los tubos la misma cantidad o volumen. El jugo llega a la parte superior de la calandria y rebalsa hacia el tubo central llevándolo hacia afuera del evaporador. (Ver figura 7).

El vapor que entra a la calandria, al transferir su energía calorífica al jugo, se condensa y sale por los colectores de condensados, colocados al nivel de su placa inferior. Estos colectores o cajas de condensados están colocados en la parte más alejada de la entrada de vapor.

Es necesario, que el agua condensada en la calandria sea desalojada lo más rápido posible para que no ocupe espacio dentro de la calandria y reduzca la superficie de transferencia de calor que está en contacto con el vapor, esto provoca que la eficiencia del evaporador disminuya. (Ver figura 3).

A continuación se presenta como se calculó el diámetro de las tuberías de entrada y salida de jugo, y de condensados del evaporador a partir de la siguiente relación:

$$V = \frac{F}{\pi d^2/4} \quad (15)$$

En donde:

V = Velocidad de fluido m/s

F = Flujo volumétrico del fluido m<sup>3</sup>/s

d = diámetro del tubo m

Despejando de la ecuación 15, se obtuvo el diámetro de la tubería necesaria con la siguiente relación:

$$d = \left[ \frac{F}{\pi V/4} \right]^{1/2} \quad (16)$$

### 2.2.9. Cálculo de la entrada y salida de vapor

El vapor se admite en la calandria por una, dos o más entradas. Generalmente es una entrada en evaporadores de menos de 3 metros de diámetro, dos entradas en los evaporadores de más de 3 metros de diámetro y algunas veces 4 entradas en los vasos muy grandes, de manera que pueda proporcionarse el vapor a todos los tubos.

“Para el vapor de entrada a la calandria se considera que la velocidad está entre 20 – 25 m/s, para la salida del evaporador del primer efecto la velocidad está entre 25 – 30 m/s, consideradas las velocidades optimas de trabajo, para aprovechar la energía del vapor y no causar arrastres.”<sup>12</sup>

---

<sup>12</sup> LOPEZ, Ferrer. Manual Práctico de maquinaria y aparatos en los ingenios de azúcar de caña. p. 360.

Se calculó el diámetro de la tubería necesaria para el transporte del vapor, de la siguiente manera:

Variables:

P = Flujo de vapor en kilogramos

P<sub>1</sub> = Flujo de vapor en kilogramos, más 10% de variación.

Q = Volumen de vapor por hora en metros cúbicos

q = Volumen de vapor por segundo en metros cúbicos

g = peso específico del vapor

S = sección transversal del tubo

D = diámetro del tubo

V = velocidad del vapor

Flujo de vapor en kg /h corregido:

$$P_1 = 1,1(P) \quad (17)$$

Flujo de vapor en m<sup>3</sup>/h:

$$Q = P_1/g \quad (18)$$

Flujo de vapor en m<sup>3</sup>/s:

$$q = Q/ (3\ 600) \quad (19)$$

Sección transversal necesaria para el flujo de vapor:

$$S = q/V \quad (20)$$

Diámetro del tubo a utilizar:

$$D = (4S/\pi)^{1/2} \quad (21)$$

### **2.2.10. Cálculo de la salida de gases incondensables de la calandria**

El vapor que llega a la calandria del evaporador lleva aire y gases extraños que no son posibles condensar al ocurrir la transferencia de energía del vapor al jugo de la caña.

Si estos gases incondensables no se extraen ocupan lugar dentro de la calandria, impidiendo que el vapor llegue a todos lados, esto hace que la transferencia de calor sea deficiente y disminuya la eficiencia del evaporador.

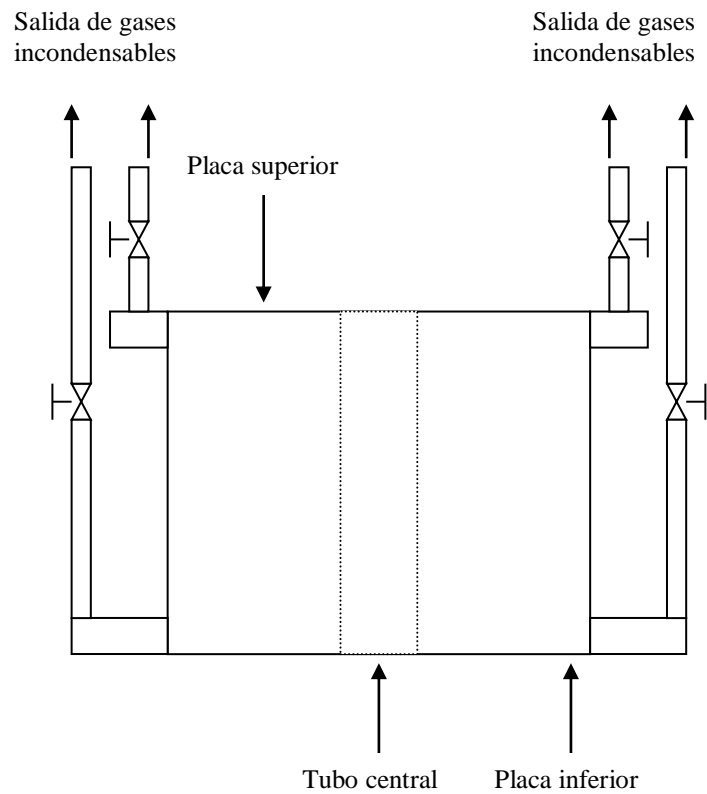
“Cuando el evaporador es alimentado con vapor de escape, es suficiente con instalar cuatro salidas de gases incondensables con tubo de 1 pulgada (0,0254 metros) de diámetro, colocando dos en la parte alta de la calandria y dos en la parte baja, además deben estar en los puntos más lejanos de las entradas de vapor, debe tener instalada una válvula para poder regular la salida, dejando escapar el suficiente vapor para garantizar la salida de los gases incondensables.”<sup>13</sup>

---

<sup>13</sup> HUGOT, Emile. Manual para Ingenieros Azucareros. 339 - 383 p.



Figura 10. **Salida de gases incondensables**



Fuente: elaboración propia con programa Word 2010.

### 2.3. Programación del montaje del evaporador

Todo proyecto tiene una serie de actividades que están interrelacionadas que deben ejecutarse en un orden lógico antes de que finalice el proyecto, tomando en cuenta que cada actividad requiere tiempo y recursos.

Para poder programar adecuadamente este proyecto se utilizó la técnica CPM por sus siglas en inglés (Método de la Ruta Crítica) y el PERT por sus siglas en inglés (Técnica de evaluación y revisión de proyectos), estos métodos

están orientados a determinar un programa de tiempo para la realización del proyecto. Este programa consiste en tres fases:

“Planeación: consiste en determinar y descomponer el proyecto en actividades simples, estimar su tiempo de realización y construir un diagrama de red para estas actividades, en el diagrama de red cada flecha representa una actividad.”<sup>14</sup>

“Programación: consiste en construir un diagrama de tiempo, en donde se muestran los tiempos de iniciación y terminación de cada actividad. También se determina la relación de cada actividad con el resto de las actividades del proyecto, esto para determinar cuáles son las actividades críticas. Las actividades que determinan el tiempo de iniciación y el de finalización siguen un camino específico y se le llama Ruta Crítica.”<sup>15</sup>

“Control: es la fase final de la administración del proyecto, esta incluye la utilización del diagrama de flechas, la gráfica de tiempo para hacer reportes periódicos del progreso, analizar la red de actividades y si es necesario determinar un nuevo programa para las restantes del proyecto.”<sup>16</sup>

“La parte más importante de las actividades es determinar la Ruta Crítica en el proyecto, para ello se deben definir los siguientes términos:

Actividad no crítica: es una tarea en la cual la diferencia de tiempo de comienzo más próximo y de terminación más tardío es mucho mayor que su duración real.

---

<sup>14</sup> [www.geocities.com/evalproyact/capitulo4.htm](http://www.geocities.com/evalproyact/capitulo4.htm). Consulta: 12 junio 2012.

<sup>15</sup> *Ibid.*

<sup>16</sup> *Ibid.*

Actividad crítica: es cuando una demora en su comienzo o en su realización, causara una demora en la terminación del proyecto.

Ruta crítica: es una serie de actividades críticas; es la ruta que identifica a todas las actividades críticas del proyecto y determinan su tiempo de realización.”<sup>17</sup>

En la programación de las actividades necesarias para realizar el proyecto se utilizo el programa Project Manager 4,0 para Windows 2007.

## **2.4. Costos**

Los costos del proyecto se dirigieron principalmente a los costos fijos y variables:

### **2.4.1. Costos fijos**

“Son aquellos en que necesariamente tiene que incurrir la empresa al iniciar operaciones. Además se mantienen constantes en el tiempo a los diferentes niveles de producción. Entre los costos fijos se tienen: depreciación de la maquinaria y herramienta, salario de supervisores, alquileres.”<sup>18</sup>

---

<sup>17</sup> [www.unamosaapuntos.tripod.com/mkt/pert/htm](http://www.unamosaapuntos.tripod.com/mkt/pert/htm). Consulta: 24 junio 2013.

<sup>18</sup> [www.monografias.com/trabajos/tprodcost/.shtml](http://www.monografias.com/trabajos/tprodcost/.shtml). Consulta: 5 mayo 2012.

### **2.4.2. Costos variables**

“Son aquellos que varían con el volumen de producción, el costo variable total se mueve en la misma dirección que la producción. Entre los más importantes tenemos: materiales, mano de obra.”<sup>19</sup>

Los precios de los materiales se obtuvieron revisando documentos en el departamento de compras de la empresa, los salarios de los trabajadores y de los supervisores fueron proporcionados por el departamento de personal, luego se hizo la tabulación de los costos para encontrar el valor total del proyecto.

---

<sup>19</sup> [www.monografias.com/trabajos/tprodcost/.shtml](http://www.monografias.com/trabajos/tprodcost/.shtml). Consulta: 5 mayo 2012.



### **3. DISEÑO METODOLÓGICO**

#### **3.1. Variables**

Las principales variables que se tuvieron en este proyecto son las siguientes:

Las dimensiones del evaporador se calcularon a partir de la cantidad de agua a evaporar y del cálculo del área de transferencia de calor que tiene como base el coeficiente de transferencia de calor del evaporador, a partir de estos datos se determinaron las dimensiones y clases de materiales a utilizar en este montaje.

El tiempo y mano de obra se calcularon a partir de la utilización del Método CPM-PERT utilizando el programa Project Manager, este nos dio de una vez un reporte de la ruta crítica y la mano de obra necesaria.

El costo del proyecto se calculó a partir de información de la cantidad de materiales y su costo, la mano de obra necesaria que se obtuvo del análisis del Project Manager.

Para la evaluación de la operación del evaporador se utilizó la variable Brix de la Meladura, la cual se analizó con el Método ANOVA.

### **3.2. Delimitación del campo de estudio**

Se puso en práctica conocimientos sobre transferencia de calor, cálculo de equipo, programación de actividades de construcción de equipo, montaje de equipo, costos de proyectos y materiales, supervisión, mano de obra y evaluación de la operación de equipos.

### **3.3. Recursos humanos disponibles**

Para la realizar este proyecto se contó con el siguiente recurso humano:

- Ingeniero jefe del proyecto
- Analista de laboratorio
- Supervisor
- Operador de grúa
- Operador de montacargas
- Operador de cargador frontal
- Soldadores
- Mecánicos
- Electricistas
- Ayudantes
- Instrumentistas

Es importante hacer ver que el número de soldadores y mecánicos se obtuvo al aplicar el Método CPM-PERT.

### **3.4. Recursos materiales disponibles**

Para este proyecto el ingenio azucarero proporciono todos los recursos materiales entre los cuales se tuvieron los siguientes:

- a. Equipo de oficina
  - Papelería
  - Computadora
  - Impresora
  - Escritorio
  
- b. Equipos industriales
  - Cortadora de plasma para a.i.
  - Cortadora oxiacetilénica
  - Polipastos
  
- c. Máquinas industriales
  - Máquinas eléctricas para soldadura
  - Grúa hidráulica 60 toneladas (58,54 Tm)
  - Montacargas 5 toneladas (4,88 Tm)
  - Cargador frontal 10 toneladas (9,76 Tm)
  
- d. Equipo de laboratorio
  - Cristalería
  - Reactivos



Además todo el material que se utilizó para la construcción del evaporador fue proporcionado por el ingenio azucarero.

### **3.5. Técnica cuantitativa**

Se utilizó el método obtenido a partir de la revisión bibliográfica y de la experiencia adquirida en un ingenio azucarero.

Los datos necesarios para el cálculo se tomaron de los departamentos de Control de Calidad, Instrumentación y bibliografía.

### **3.6. Recolección y ordenamiento de la información**

La información o datos se obtuvieron de las siguientes fuentes: el laboratorio, Departamento de Suministros o bodega de materiales, Recursos Humanos y material bibliográfico, cada uno de estos departamentos tiene sus formatos para entregar la información, de esa manera se obtuvo ordenada para poder utilizarla para su tratamiento.

### **3.7. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información**

Obtenida la información ordenada de las distintas fuentes del ingenio azucarero se procedió a tabularla de acuerdo a los métodos de análisis que se utilizaron, para el tiempo y mano de obra, se ingresaron al programa Project Manager las actividades y los tiempos que tarda cada una, se obtuvo el tiempo crítico y el personal necesario.

El costo de mano de obra se calculó tabulando el salario diario del personal, prestaciones laborales y el tiempo de trabajo.

El costo de los materiales se obtuvo tabulado del departamento de suministros y se realizó el cálculo total del costo.

En la evaluación de la operación del evaporador al ser puesto en marcha se utilizaron los formatos necesarios de acuerdo al método de análisis de Varianza.

### **3.8. Análisis estadístico**

“El evaporador se puso en marcha al inicio de la zafra 2011- 2012 y se evaluó su operación a partir de la comparación de las mediciones de los grados Brix de la meladura que están saliendo de la estación de evaporación. Se compararon los datos históricos de la zafra anterior contra los obtenidos de la zafra 2011-2012, entonces se realizó el análisis de varianza que es una prueba que nos permite medir la variación de las respuestas numéricas como valores de evaluación de diferentes variables nominales.”<sup>20</sup>

Para realizar el tratamiento de los resultados se utilizó el siguiente procedimiento:

$C$  = Número de valores nominales

$n$  = Total de Datos

$n_j$  = Total de datos de la  $j$ -ésima columna

$\bar{y}$  = Promedio total de todos los datos

$\bar{y}_j$  = Promedio de la  $j$ -ésima columna

---

<sup>20</sup> [www.elosiodelosantos.com/sergiman/andeva.htm](http://www.elosiodelosantos.com/sergiman/andeva.htm). Consulta: 19 de mayo de 2012.

La corrección de la media (CM), esta se calculó a partir de la siguiente ecuación:

$$CM = \bar{ny}^2 \quad (22)$$

La suma del cuadrado de los tratamientos (SCC), se determinó utilizando la ecuación:

$$SCC = \sum \bar{n}_j y_j^2 - CM \quad (23)$$

A continuación se calculó la suma de los cuadrados totales (SCT) utilizando la ecuación:

$$SCT = \sum \sum y_{ij}^2 - CM \quad (24)$$

En el paso siguiente se obtuvo la suma de los cuadrados del error (SCE) utilizando la relación:

$$SCE = SCT - SCC \quad (25)$$

Los grados de libertad nominal (gl1) se determinaron de la siguiente manera:

$$gl1 = c - 1 \quad (26)$$

Los grados de libertad numéricos (gl2) se determinaron de la siguiente manera:

$$gl2 = n - c \quad (27)$$

El siguiente dato que se calculó, es el cuadrado medio de los tratamientos (CMT) utilizando la relación siguiente:

$$CMT = \frac{SCC}{gl1} \quad (28)$$

Se calculó el cuadrado medio del error (CME) utilizando:

$$CME = \frac{SCE}{gl2} \quad (29)$$

El valor para la prueba de distribución (F) se calculó de la siguiente manera:

$$F = \frac{CMT}{CME} \quad (30)$$

A continuación se determinó el valor de  $\alpha$  utilizando la relación siguiente:

$$\alpha = \int_{\xi}^{\infty} \frac{gl1 \cdot \frac{gl2}{2} \cdot \frac{gl2}{2} \cdot \frac{gl2 - 1}{2} \cdot X}{B \left[ \frac{gl1}{2}, \frac{gl2}{2} \right] \left( gl1 + gl2 \cdot x \right)^{\frac{gl1 + gl2}{2}}} \quad (31)$$

El criterio convencional para los valores de  $\alpha$  es el siguiente: Si  $\alpha$  es menor de 0,05 se determina que la hipótesis alternativa es la que se valida.

Si  $\alpha$  es mayor de 0,05 se decide por la hipótesis nula y quiere decir que estadísticamente no hay diferencia significativa entre los valores nominales, y el nivel de significancia es de 95 %.

## 4. RESULTADOS

### 4.1. Resultados del diseño y cálculo del evaporador

Los resultados que se obtuvieron para las dimensiones del evaporador, se presentan en la siguiente tabla:

Tabla I. Resultados del diseño y cálculo del evaporador

No.	VARIABLES	DIMENSIONES
1	AGUA EVAPORADA	177,29 lb/s (80,59 Kg/s)
2	COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CALOR	3 570,62 [w / (m <sup>2</sup> . K)]
3	CALOR TRANSFERIDO	43 977,96 Kcal/s (184 126,88 kJ/s)
4	ÁREA DE INTERCAMBIO DE CALOR DEL EVAPORADOR	30 600 pies cuadrados (2 844,29 m <sup>2</sup> )
5	NUMERO DE TUBOS DE LA CALANDRIA	7 930 tubos
6	LARGO DE LOS TUBOS	10 Pies (3,05 m)
7	DIÁMETRO DE LOS TUBOS	1,5 pulgadas (0,0381 m)
8	DISTANCIA ENTRE TUBOS (P)	2 pulgadas (0,0508 m)
9	DIÁMETRO DE LA CALANDRIA	16 pies 2 pulgadas (4,93 m)
10	DIÁMETRO DEL TUBO CENTRAL	24 Pulgadas (0,61 m)
11	DIÁMETRO DEL CUERPO DEL EVAPORADOR	16 Pies 2 Pulgadas (4,93 m)
12	ALTURA DEL CUERPO DEL EVAPORADOR	16.5 pies (5,03 m)
13	DIMENSIONES DE LA CÚPULA DEL EVAPORADOR	
13.1	D	6 pies (1,83 m)
13.2	D	12,5 pies (3,811 m)
13.3	M	10 pies (3,049 m)
13.4	H	5 pies (1,524 m)
13.5	L	6 pies (1,83 m)
19	FONDO DEL EVAPORADOR	16 pies 2 pulgadas (4,93 m)

Continuación de la tabla I.

20	DEFLECTOR DEL DISTRIBUIDOR DE JUGO	
20.1	DIÁMETRO INTERIOR	12 pulgadas (0,305 m)
20.2	DIÁMETRO EXTERIOR	24 pulgadas (0,610 m)
21	DIÁMETRO TUBO ENTRADA DE JUGO	10 pulgadas (0,254 m)
22	DIÁMETRO TUBO SALIDA DE JUGO	12 pulgadas (0,305 m)
26	DIÁMETRO TUBO SALIDA DE CONDENSADOS	6 pulgadas (0,152)
27	DIÁMETRO DEL TUBO DE ENTRADA DE VAPOR	30 pulgadas (0,762 m)
28	DIÁMETRO DEL TUBO DE SALIDA DE VAPOR	42 pulgadas (1,07 m)
29	SALIDA DE GASES INCONDENSABLES	1 pulgada (0,0254 m)

Fuente: elaboración propia.

#### 4.2. Materiales necesarios para construcción del evaporador

Los materiales que se utilizaron para el proyecto de ampliación de la etapa de evaporación se calcularon a partir de las dimensiones del evaporador y se presentan en la tabla II.

Tabla II. **Materiales utilizados en la construcción y montaje del evaporador**

No.	MATERIAL	CANTIDAD UTILIZADA	UNIDADES	COSTO UNITARIO	COSTO
1	Lámina H. N. 1/4 " (0.006 m)	360	Pie2	Q38,75	Q13 950,00
2	Lámina H. N. 3/8 " (0.01 m)	480	Pie2	Q67,78	Q32 534,40
3	Lámina H. N. 1/2 " (0.013 m)	240	Pie2	Q77,50	Q18 600,00
4	Lamina H. N. 5/8 " (0.016 m)	1 200	Pie2	Q107,00	Q128 400,00
5	Lámina H. N. 3/4 " (0.019 m)	120	Pie2	Q131,71	Q15 805,20
6	Lámina H. N. 1 1/4 " (0.032 m)	32	Pie2	Q178,68	Q5 717,76

Continuación de la tabla II.

No.	MATERIAL	CANTIDAD UTILIZADA	UNIDADES	COSTO UNITARIO	COSTO
7	Lámina A. I. 3/8 " (0.01 m)	120	Pie2	Q313,61	Q37 633,20
8	Lámina A. I. 3/4 " (0.019 m)	640	Pie2	Q665,78	Q426 099,20
9	Lámina A. I. 1/2 " (0.013 m)	360	Pie2	Q425,39	Q153 140,40
10	Lámina H. N. 1" (0.025 m)	32	Pie2	Q189,91	Q6 077,12
11	Lámina aca. Galv. 12' (3.659 m) cal.28	20	U	Q126,00	Q2 520,00
12	Lámina aca. Galv. 10' (3.049 m) cal. 28	30	U	Q96,80	Q2 904,00
13	Lámina lisa galvanizada calibre 28	512	Pie2	Q3,78	Q1 935,36
14	Tornillo 7/8" X 7" (0.022 X 0.178 m)	60	U	Q15,00	Q900,00
15	Tornillo 3/4"X6 1/2"(0.019X0.165m)	40	U	Q10,16	Q406,40
16	Tornillo 3/4" X 6" ( 0.019 X 0.152 m)	40	U	Q6,40	Q256,00
17	Tornillo 3/4" X 5 1/2" (0.019 X 0.14 m)	30	U	Q6,67	Q200,10
18	Tornillo 3/4" X 3 1/2" (0.019 X 0.89 m)	60	U	Q5,30	Q318,00
19	Tornillo 5/8" X 5" (0.016 X 0.127 m)	60	U	Q3,50	Q210,00
20	Tornillo 5/8" X 3 1/2" (0.016 X 0.89 m)	40	U	Q2,47	Q98,80
21	Tornillo 1/2"X 2 1/2" (0.013X 0.064m)	80	U	Q1,32	Q105,60
22	Tornillo 1/2"X 2" A.I.(0.013 X 0.051 m)	60	U	Q28,35	Q1 701,00
23	Tornillo 1 1/8" X 6" (0.029 X 0.152 m)	80	U	Q60,00	Q4 800,00
24	Tornillo 1 1/4" X 7" (0,032 X 0,178 m)	60	U	Q72,00	Q4 320,00
25	Tornillo 1/4"X1 1/2" (0,006 X0,038 m)	800	U	Q0,25	Q200,00
26	Tuerca 7/8" (0,022 m)	60	U	Q1,71	Q102,60
27	Tuerca 3/4" (0,019 m)	170	U	Q1,30	Q221,00
28	Tuerca 5/8" (0,016 m)	100	U	Q0,70	Q70,00
29	Tuerca 1/2" (0,013 m)	80	U	Q0,33	Q26,40
30	Tuerca 1/2" A.I. (0,013 m)	60	U	Q1,71	Q102,60
31	Tuerca 1 1/8" (0,029 m)	80	U	Q3,91	Q312,80
32	Tuerca 1 1/4" (0,032 m)	60	U	Q4,50	Q270,00
33	Roldana 7/8" (0,022 m)	60	U	Q0,28	Q16,80



Continuación de la tabla II.

No.	MATERIAL	CANTIDAD UTILIZADA	UNIDADES	COSTO UNITARIO	COSTO
34	Roldana 3/4" (0,019 m)	170	U	Q0,26	Q44,20
35	Roldana 5/8" (0,016 m)	100	U	Q0,22	Q22,00
36	Roldana 1/2" (0,013 m)	80	U	Q0,12	Q9,60
37	Roldana 1/2" A.I. (0,013 m)	60	U	Q0,56	Q33,60
38	Roldana 1 1/8" (0,029 m)	80	U	Q1,85	Q148,00
39	Roldana 1 1/4" (0,032 m)	60	U	Q1,92	Q115,20
40	Roldana de presión 7/8" (0,022 m)	60	U	Q0,55	Q33,00
41	Roldana de presión 3/4" (0,019 m)	170	U	Q0,33	Q56,10
42	Roldana de presión 5/8" (0,016 m)	100	U	Q0,18	Q18,00
43	Roldana de presión 1/2" (0,013 m)	80	U	Q0,11	Q8,80
44	Roldana de presión 1/2"A.I. (0,013 m)	60	U	Q1,21	Q72,60
45	Roldana de presión 1 1/8" (0,029 m)	80	U	Q2,01	Q160,80
46	Roldana de presión 1 1/4" (0,032 m)	60	U	Q7,32	Q439,20
47	Válvula 30" hidráulica (0,762 m)	1	U	Q49 246,40	Q49 246,40
48	Válvula 24" hidráulica (0,61 m)	2	U	Q64 350,10	Q128 700,20
49	Válvula 12" automática on off (0,305m)	1	U	Q28 967,29	Q28 967,29
50	Válvula 10" automática on off (0,254m)	1	U	Q21 817,12	Q21 817,12
51	Válvula 8" automática on off (0,203m)	1	U	Q12 096,70	Q12 096,70
52	Válvula 8" automática reg. (0,203 m)	1	U	Q15 380,30	Q15 380,30
53	Válvula 6" automática on off (0,152 m)	3	U	Q11 671,52	Q35 014,56
54	Válvula 4" automática on off (0,102 m)	1	U	Q5 161,15	Q5 161,15
55	Válvula 6" manual (0,152 m)	2	U	Q6 000,00	Q12 000,00
56	Válvula 4" manual (0,102 m)	2	U	Q3 580,00	Q7 160,00
57	Válvula 1" manual 0,025 m)	4	U	Q665,30	Q2 661,20
58	Válvula 3/4" manual (0,019 m)	4	U	Q58,45	Q233,80
59	Válvula 3/4" porta nivel (0,019 m)	8	U	Q853,52	Q6 828,16
60	Tubo 12" A.I. (0,305 m)	40	Pies	Q1 400,00	Q56 000,00

Continuación de la tabla II.

No.	MATERIAL	CANTIDAD UTILIZADA	UNIDADES	COSTO UNITARIO	COSTO
61	Tubo 10" A.I. (0,254 m)	40	Pies	Q1 281,32	Q51 252,80
62	Tubo 6" A.I. (0,152 m)	60	Pies	Q502,28	Q30 136,80
63	Tubo 6" H.N. (0,152 m)	80	Pies	Q113,20	Q9 056,00
64	Tubo 4" H.N. (0,102 m)	60	Pies	Q71,31	Q4 278,60
65	Tubo 4" A.I. (0,152 m)	80	pies	Q215,99	Q17 279,20
66	Tubo 2 1/2" A.I. (0,064)	20	Pies	Q123,76	Q2 475,20
67	Tubo 1" A.I. (0,025 m)	120	Pies	Q40,00	Q4 800,00
68	Tubo 1 1/2" X 10' A.I. cal 16 (0,038 mx3,049 m)	7 930	U	Q548.60	Q4 350 398,00
69	Tubo 3/4" Galv. (0,019 m)	40	Pies	Q6,55	Q262,00
70	Tubo 3/4" X 30" vidrio pírex (0,019 X 0,76m)	4	U	Q370,00	Q1 480,00
71	Codo 12" 90 grados A.I. (0,305 m)	1	U	Q2 864,93	Q2 864,93
72	Codo 10" 90 grados A.I. (0,254 m)	2	U	Q2 694,90	Q5 389,80
73	Codo 6" 90 grados A.I. (0,152 m)	8	U	Q899,15	Q7 193,20
74	Codo 6" 90 grados H.N. (0,152 m)	5	U	Q178,00	Q890,00
75	Codo 1" 90 grados A.I. (0,025 m)	4	U	Q23,64	Q94,56
76	Codo 4" 90 grados A.I. (0,102 m)	6	U	Q250,00	Q1 500,00
77	Codo 4" 90 grados H.N. (0,102 m)	8	U	Q60,00	Q480,00
78	Codo 3/4" 90 grados Galv. (0,019 m)	6	U	Q5,10	Q30,60
79	Unión universal 1" A. I. (0,0254 m)	4	U	Q74,00	Q296,00
80	Coplas 3/4" A. I. (0,019 m)	8	U	Q21,34	Q170,72
81	Electrodo 6010 1/8" (0,003 m)	800	Lb	Q9,48	Q7 584,00
82	Electrodo 7018 1/8" (0,003 m)	1 500	Lb	Q8,94	Q13 410,00
83	Electrodo A. I 1/8" (0,003 m)	800	Lb	Q36,00	Q28 800,00
84	Cepillo de Alambre	250	U	Q16,97	Q4 242,50
85	Tizas	60	U	Q0,75	Q45,00
86	Vidrios claros para careta	80	U	Q0,75	Q60,00

Continuación de la tabla II.

No.	MATERIAL	CANTIDAD UTILIZADA	UNIDADES	COSTO UNITARIO	COSTO
87	Vidrios oscuros para careta	80	U	Q1,71	Q136,80
88	Vidrios claros para lentes de corte	60	Par	Q0,78	Q46,80
89	Vidrios oscuros para lentes de corte	60	Par	Q2,25	Q135,00
90	Guantes de cuero manga larga	40	Par	Q26,00	Q1 040,00
91	Guantes de cuero manga corta	40	Par	Q22,00	Q880,00
92	Chispero	30	U	Q14,00	Q420,00
93	Piedra para chispero	150	U	Q1,25	Q187,50
94	Cilindro de oxígeno	160	U	Q156,90	Q25 104,00
95	Cilindro de Acetileno	80	U	Q250,00	Q20 000,00
96	Cortador oxiacetilénico	12	U	Q785,37	Q9 424,44
97	Maneral para cortador oxiacetilénico	12	U	Q785,37	Q9 424,44
98	Manguera para equipo oxiacetilénico	400	Pies	Q4,05	Q1 620,00
99	Regulador de oxígeno	12	U	Q475,00	Q5 700,00
100	Regulador de Acetileno	12	U	Q475,00	Q5 700,00
101	Sierra acero plata	300	U	Q7,75	Q2 325,00
102	Porta electrodo 600 amperios	30	U	Q160,00	Q4,800.00
103	Cable 2/0 para máquina de soldar	450	Pies	Q26,80	Q12 060,00
104	Polipasto 5 toneladas (4.55 Tm)	1	U	Q16 640,00	Q16 640,00
105	Polipasto 3 toneladas (2.73 Tm)	1	U	Q2 395,37	Q2 395,37
106	Flange 30"(0.792 m)H.N.125 psi(861.84 kPa)	2	U	Q5 981,26	Q11 962,52
107	Flange 24(0.61 m)H.N. 125 psi(861.84kPa)	4	U	Q2 175,35	Q8 701,40
108	Flange 12"(0.305 m)H.N. 125 psi(861.84kPa)	6	U	Q623,00	Q3 738,00
109	Flange 10" (0.254 m)H.N. 125 psi(861.84kPa)	6	U	Q355,00	Q2 130,00
110	Flange 8"(0.203 m)H.N. 125 psi(861.84kPa)	12	U	Q255,60	Q3 067,20
111	Flange 6"(0.152 m) H.N. 125 psi (861.84kPa)	10	U	Q185,00	Q1 850,00
112	Flange 4" (0.102 m)H.N. 125 psi (861.84kPa)	16	U	Q125,00	Q2 000.00
113	Hembra 1 /2" X 4" H.N. (0.013X0.102 m)	80	Pies	Q24,18	Q1 934,40

Continuación de la tabla II.

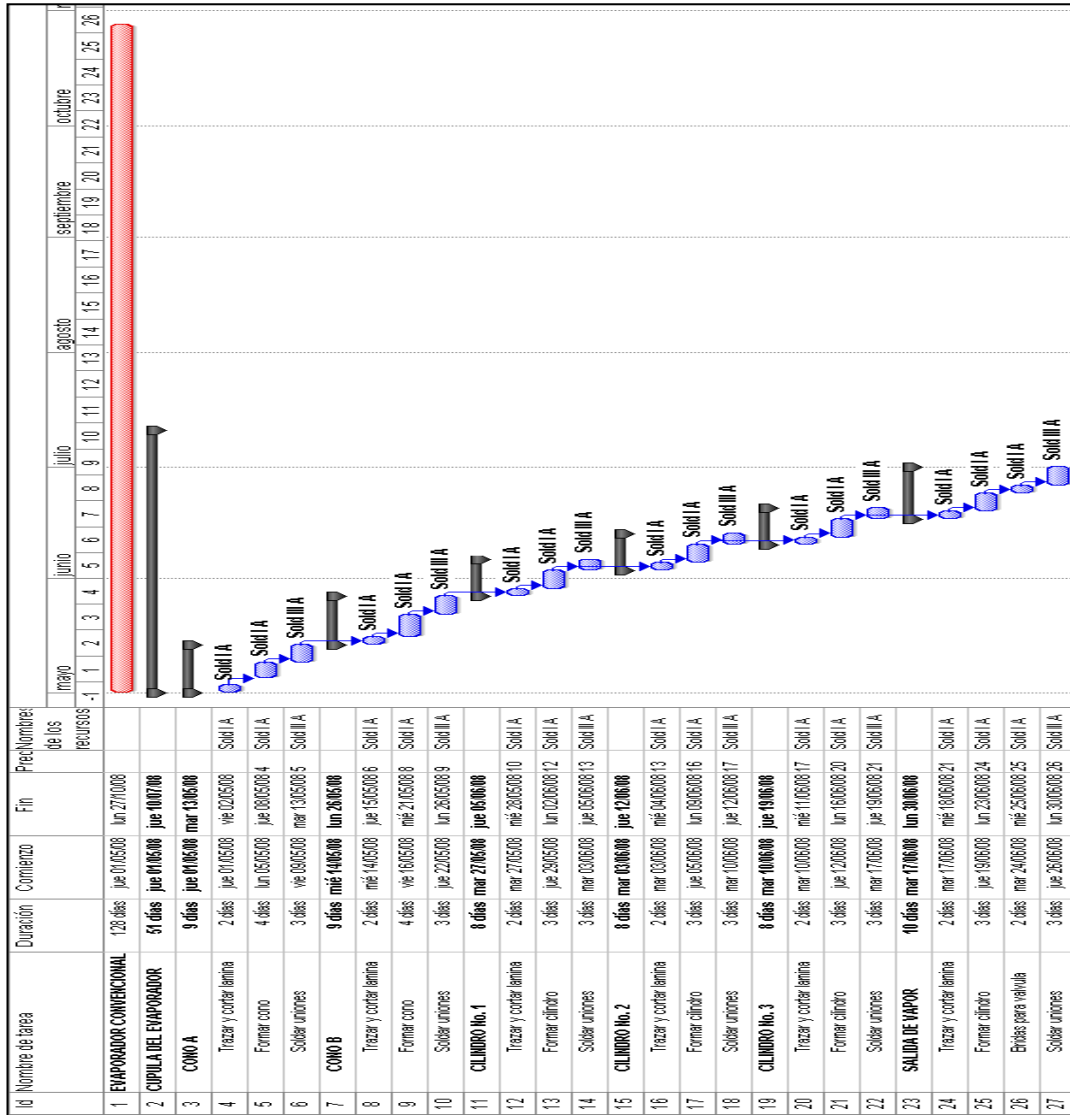
No.	MATERIAL	CANTIDAD UTILIZADA	UNIDADES	COSTO UNITARIO	COSTO
114	Hembra 1/8" X 1 1/2" H.N. (	460	Pies	Q2,39	Q1 099,40
115	Angular 1/4X 3X3"(0.006X0.076X0.076m)	72	Pies	Q21,50	Q1 548,00
116	Angular 1/4X2 1/2X2 1/2" (0.006X0.064X0.046m)	12	Pies	Q14,45	Q173,40
117	Sensor electrónico de presión	1	U	Q9 380,84	Q9 380,84
118	Sensor electrónico de temperatura	1	U	Q7 295,00	Q7 295,00
119	Sensor electrónico de nivel	1	U	Q21 144,08	Q21 144,08
120	Manómetro 0-30 psi (0-206.85 kPa) caratula 4" (0.102 m)	2	U	Q875,00	Q1 750,00
121	Lucetas de vidrio pírex	5	U	Q1 230,00	Q6 150,00
122	Fibra de vidrio aislante	1 900	Pie2	Q40,00	Q76 000,00
123	Pintura anticorrosiva	75	galón	Q76,00	Q5 700,00
124	Gasolina regular	300	galón	Q31,50	Q9 450,00
125	Wipe	100	lb	Q10,00	Q1 000,00
126	Grasa Multipropósito	50	lb	Q15,85	Q792,50
127	Broca 1" (0.0254 m)	40	U	Q418,90	Q16 756,00
128	Broca 1 17/32" (0.0389 m)	4	U	Q2 980,90	Q11 923,60
129	Limas	40	U	Q45,00	Q1 800,00
130	Discos para pulir	60	U	Q42,50	Q2 550,00
131	Bomba 6X8X15(0.152X0.203X0.381m)	1	U	Q84 583,97	Q84 583,97
132	Motor 75 HP (55,927.49 J/s)	1	U	Q33 320,19	Q33 320,19
133	Viga H 14" X 120 lb (0.356 m X 54.55 Kg)	100	pies	Q630,89	Q63 089,00
134	Viga I 33" X 118 lb (0.838 m X 53.64 Kg)	80	pies	Q818,14	Q65 451,20
135	Viga I 12 X 26 lb (0.305 m X 11.82 Kg)	160	pies	Q128,74	Q20 598,40
<b>TOTAL COSTO DE MATERIALES</b>					<b>Q6 381 831,8</b>

Fuente: elaboración propia.

#### **4.3. Programación de actividades del proyecto del evaporador**

Las actividades a realizar para la construcción y montaje del evaporador se determinaron a partir del anexo 1, los tiempos que tarda cada una de ellas, está basado en la experiencia de campo, a partir de esto se obtuvo la ruta crítica y el tiempo de realización del proyecto.

Tabla III. Actividades y tiempos de realización para la construcción y montaje del evaporador, gráfica de la ruta crítica para la realización del proyecto



Continuación de la tabla III.

Id	Nombre de tarea	Duración	Comienzo	Fin	Precedentes de los recursos	Meses																														
						mayo	junio	julio	agosto	septiembre	octubre																									
						-1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26				
28	ARMAR CUPULA	11 días	jue 26/06/08	jue 10/07/08																																
29	Unir partes de la cupula	5 días	jue 26/06/08	mié 02/07/08:26	Sold I A																															
30	soldar uniones	6 días	jue 03/07/08	jue 10/07/08:29	Sold III A																															
31	CUERPO DEL EVAPORADOR	41 días	jue 19/06/08	jue 28/08/08																																
32	COMO C	9 días	jue 19/06/08	mar 13/06/08																																
33	Trazar y cortar lamina	2 días	jue 19/06/08	vie 02/06/08	Sold I B																															
34	Formar cono	4 días	lun 30/06/08	jue 08/06/08:33	Sold I B																															
35	Soldar uniones	3 días	vie 08/06/08	mar 13/06/08:34	Sold III B																															
36	COMO D	9 días	vie 08/06/08	mié 27/06/08																																
37	Trazar y cortar lamina	2 días	vie 08/06/08	lun 22/06/08:34	Sold I B																															
38	Formar cono	4 días	mar 13/06/08	vie 16/06/08:37	Sold I B																															
39	Soldar uniones	3 días	lun 19/06/08	mié 27/06/08:38	Sold III B																															
40	CUERPO No. 4	9 días	lun 19/06/08	jue 29/06/08																																
41	Trazar y cortar lamina	2 días	lun 19/06/08	mar 20/06/08:38	Sold I B																															
42	Formar cilindro	4 días	mié 27/06/08	lun 26/06/08:41	Sold I B																															
43	Soldar uniones	3 días	mar 27/06/08	jue 29/06/08:42	Sold III B																															
44	CUERPO No. 5	9 días	mar 27/06/08	vie 06/06/08																																
45	Trazar y cortar lamina	2 días	mar 27/06/08	mié 28/06/08:42	Sold I B																															
46	Formar cilindro	4 días	jue 29/06/08	mar 03/06/08:45	Sold I B																															
47	Soldar uniones	3 días	mié 04/06/08	vie 06/06/08:46	Sold III B																															
48	CUERPO No. 6	9 días	mié 04/06/08	lun 16/06/08																																
49	Trazar y cortar lamina	2 días	mié 14/06/08	jue 15/06/08:46	Sold I B																															
50	Formar cilindro	4 días	vie 16/06/08	mié 11/06/08:49	Sold I B																															
51	Soldar uniones	3 días	jue 12/06/08	lun 16/06/08:50	Sold III B																															
52	ARMAR CUERPO	11 días	jue 12/06/08	jue 28/06/08																																
53	Unir partes de la cupula	6 días	jue 12/06/08	jue 19/06/08:50	Sold I B																															
54	soldar uniones	5 días	vie 20/06/08	jue 28/06/08:53	Sold III B																															









Continuación de la tabla III.

id	Nombre de tarea	Duración	Comienzo	Fin	Pre-Nombres de los REQUISITOS																								
						julio	agosto	septiembre	octubre	noviembre																			
						7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
136	Colocar mesas o sillas	2.5 días	mié 09/07/08	vie 11/07/08	135	Solid B, Solid H																							
137	<b>INDICADOR DE NIVEL DE JUEGO</b>	<b>20 días</b>	<b>vie 11/07/08</b>	<b>vie 08/08/08</b>																									
138	Trazar y cortar tubo	4 días	vie 11/07/08	jea 17/07/08	136	Solid D																							
139	armar nivel	4 días	jea 17/07/08	mié 23/07/08	138	Solid D																							
140	Colocar copias 34"	3 días	mié 23/07/08	lun 29/07/08	139	Solid D																							
141	Colocar vehiculos contenedor	1 día	lun 29/07/08	mar 29/07/08	140	Mec A, Mec B																							
142	Sobrar uniones	4 días	mar 29/07/08	lun 04/08/08	141	Solid D																							
143	colocar muelles de jupo	4 días	lun 04/08/08	vie 08/08/08	142	Solid D																							
144	<b>PRUEBA DEL EVAPORADOR</b>	<b>17 días</b>	<b>vie 08/08/08</b>	<b>lun 27/08/08</b>																									
145	Hacer prueba ilustrativa de la cabina	3 días	vie 08/08/08	mar 07/08/08	114	Mec A, Mec B																							
146	Hacer prueba ilustrativa del cuerpo	3 días	vie 08/08/08	mar 07/08/08	114	Mec A, Mec B																							
147	Hacer las reparaciones necesarias	3 días	mié 08/08/08	vie 07/08/08	145	Mec A, Mec B																							
148	Colocar fibra asistente	4 días	lun 13/08/08	jea 19/08/08	147	Mec A, Mec B																							
149	Instalar lamina protectora de la fibra	4 días	vie 17/08/08	mié 23/08/08	148	Mec A, Mec B																							
150	Prisar el evaporador	3 días	jea 23/08/08	lun 27/08/08	149	Mec A, Mec B																							
151	Fin proyecto	0 días	lun 27/08/08	lun 27/08/08	150																								

Fuente: elaboración propia, con base a programa Microsoft Project.

#### **4.4. Costo de mano de obra (operación, supervisión y dirección)**

En el cálculo del costo de la mano de obra se hizo, tomando en cuenta el personal operativo, el personal técnico y el de supervisión, que participaron en el proyecto. Los datos de salarios y cálculo del pasivo laboral se obtuvieron del Departamento de Recursos Humanos.

Tabla IV. Descripción de puestos, salarios y prestaciones de la mano de obra involucrada en el proyecto

Descripción de Puesto	No. De Trabajadores	Salario Diario	TOTAL MENSUAL	TOTAL PRESTACIONES	TOTAL CITRABANADOR	TOTAL PROYECTO
Mecánico I	2	Q 110.00	Q 3,300.00	Q 5,885.89	Q 25,185.89	Q 50,371.78
Soldador I	4	Q 125.00	Q 3,750.00	Q 6,472.60	Q 28,972.60	Q 115,890.41
Soldador III	2	Q 89.33	Q 2,679.90	Q 4,825.58	Q 20,704.98	Q 41,409.96
Ayudante	6	Q 71.33	Q 2,139.90	Q 3,883.53	Q 16,532.93	Q 33,065.86
Operador Grúa	1	Q 85.33	Q 2,559.90	Q 4,418.46	Q 19,777.86	Q 19,777.86
Operador Terreno	1	Q 85.33	Q 2,559.90	Q 4,418.46	Q 19,777.86	Q 19,777.86
Arriolado de Laboratorio	1	Q 110.00	Q 3,300.00	Q 5,885.89	Q 25,185.89	Q 25,185.89
Instrumentista	1	Q 110.00	Q 3,300.00	Q 5,885.89	Q 25,185.89	Q 25,185.89
Electricista	1	Q 110.00	Q 3,300.00	Q 5,885.89	Q 25,185.89	Q 25,185.89
Supervisor	1	Q 233.33	Q 6,999.90	Q 12,602.02	Q 54,001.42	Q 54,001.42
Jefe Monte	1	Q 500.00	Q 15,000.00	Q 25,880.41	Q 115,890.41	Q 115,890.41
<b>TOTAL</b>	<b>18</b>	<b>Q 1,299.65</b>	<b>Q 38,989.50</b>	<b>Q 67,296.95</b>	<b>Q 301,233.95</b>	<b>Q 593,504.93</b>

Tiempo de realizables de proyecto 180 días  
 Prestaciones incluye: Bono 14, aguinaldo, vacaciones y liquidación por tiempo de trabajo

Fuente: Departamento de Recursos Humanos.

#### **4.5. Costo total del proyecto**

Evaporador convencional de 30 600 pies cuadrados (2 844,29 metros cuadrados) de superficie de transferencia de calor.

Costo de materiales	Q. 6 381 831,08
Costo de Mano de obra	<u>Q. 593 504,93</u>
Total	Q. 6 975 336,01

#### **4.6. Procedimiento de arranque del evaporador**

Para iniciar la operación del evaporador nuevo con seguridad y eficiencia se siguieron los siguientes pasos:

- A. Revisar el evaporador físicamente, registros, válvulas, lucetas, nivel.
- B. Desde la pantalla de control ver estado de las válvulas y nivel, si trabaja bien y si coincide con lo físico.
- C. Tener el sistema de control en estado manual.
- D. Colocar en parámetros el nivel de operación del evaporador en 33% del nivel de la calandria, para que la válvula reguladora de entrada de jugo, controle el flujo de jugo y el nivel para que no ocurran arrastres al agua condensada.
- E. Abrir la válvula de salida de vapor desde la pantalla y revisar físicamente que está abierta.

- F. Abrir la válvula de salida de condensados desde la pantalla de control y revisar físicamente que este abierta.
- G. Abrir la válvula de entrada de jugo desde la pantalla y revisar físicamente que está abierta.
- H. Nivelar el evaporador, esto quiere decir que se llene el evaporador hasta la altura del espejo superior de la calandria.
- I. Cuando el jugo llegue al nivel requerido cierre la válvula de entrada de jugo.
- J. Abrir las válvulas de entrada de vapor a la calandria.
- K. Esperar a que el jugo empiece a hervir, a una temperatura de 220 grados Fahrenheit (377,59 K).
- L. Abrir la válvula de salida de jugo.
- M. Encender la bomba de transferencia para mandar el jugo de salida al siguiente evaporador.
- N. Abrir la válvula de entrada de jugo.
- O. Revisar de manera continua que los datos y estado del sistema de automatización coincidan con los datos y estados del sistema en el campo.
- P. Colocar el sistema de control del evaporador en automático.

**4.7. Datos de operación de la estación de evaporación del ingenio azucarero**

En la tabla siguiente se tabulan los datos de °Brix de la meladura de la zafra 2010-2011 como referencia de la operación del evaporador nuevo en la zafra 2011-2012.

**Tabla V. Datos Brix meladura zafras, 2010-2011 y 2011-2012**

ZAFRA 2010-2011		ZAFRA 2011-2012	
Fecha	Brix Meladura	Fecha	Brix Meladura
01/01/2011	69,36	01/01/2012	69,09
02/01/2011	71,30	02/01/2012	64,16
03/01/2011	72,59	03/01/2012	63,30
04/01/2011	72,02	04/01/2012	66,50
05/01/2011	69,81	05/01/2012	65,07
06/01/2011	70,65	06/01/2012	66,10
07/01/2011	69,52	07/01/2012	65,74
08/01/2011	69,67	08/01/2012	69,09
09/01/2011	70,31	09/01/2012	66,04
10/01/2011	69,23	10/01/2012	72,14
11/01/2011	68,56	11/01/2012	67,20
12/01/2011	71,75	12/01/2012	67,91
13/01/2011	70,38	13/01/2012	67,22
14/01/2011	72,13	14/01/2012	68,57
15/01/2011	73,61	15/01/2012	69,75
16/01/2011	73,75	16/01/2012	67,87
17/01/2011	72,04	17/01/2012	67,09
18/01/2011	69,89	18/01/2012	65,57
19/01/2011	71,33	19/01/2012	70,17



Continuación de la tabla V.

20/01/2011	72,42	20/01/2012	66,55
21/01/2011	68,18	21/01/2012	68,58
22/01/2011	69,34	22/01/2012	69,21
23/01/2011	76,57	23/01/2012	66,08
24/01/2011	71,36	24/01/2012	68,21
25/01/2011	71,58	25/01/2012	70,81
26/01/2011	70,38	26/01/2012	68,92
27/01/2011	69,39	27/01/2012	70,57
28/01/2011	67,77	28/01/2012	70,18
29/01/2011	68,67	29/01/2012	68,61
30/01/2011	70,37	30/01/2012	67,17

Fuente: Laboratorio de aseguramiento de la calidad.

#### 4.8. Análisis estadístico

Para los datos obtenidos de brix de las zafra 2010-2011 y zafra 2011-2012 (tabla IV) utilizando el Método ANOVA descrito en la sección 3.8. Se tienen que:

A. Número de valores Nominales

$$c = 2 \text{ (Zafra 2010-2011, zafra 2011-2012).}$$

B. Número total de datos

$$n = 60$$

C. Número de datos de la zafra 2010-2011

$$n_1 = 30$$

D. Número de datos de la zafra 2011-2012

$$n_2 = 30$$

E. Promedio total de todos los datos.

$$\bar{Y} = 68,27$$

F. Promedio del brix de zafra 2010-2011

$$\bar{Y}_1 = 68,77$$

G. Promedio del brix de zafra 2011-2012

$$\bar{Y}_2 = 68,77$$

H. Cuadrado del promedio de datos zafra 2010-2011

$$Y_1^2 = 4\,728,67$$

I. Cuadrado del promedio de datos zafra 2011-2012

$$Y_2^2 = 4\,594,44$$

J. Corrección de la media

$$CM = 279\,678,98$$

K. Suma del cuadrado de los tratamientos

$$SSC = 14,49$$

L. Suma de los cuadrados totales

$$SCT = 228,04$$

M. Suma de los cuadrados del error

$$SCE = 213,55$$

N. Grados de libertad Nominales

$$gl1 = 1$$

O. Grados de libertad tratamientos

$$gl2 = 58$$

P. Cuadrado medio de los tratamientos

$$CMC = 14,49$$

Q. Cuadrado medio del error

$$CME = 3,68$$

R. Valor para la Prueba

$$F = 3,94$$

S. Valor de  $\alpha$

$$\alpha = \text{DISTRF}(3,94; 1; 58)$$

$$\alpha = 0,052$$

Se tiene que el valor de  $\alpha$  es mayor de 0,05 por lo que confirma la hipótesis nula, y confirma que el evaporador es el adecuado para este proceso.

## 5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

En el presente trabajo se llevó a cabo el proyecto de diseño y evaluación de un evaporador convencional para un Ingenio azucarero con el objetivo de mejorar la eficiencia de la operación de extracción de sacarosa.

El proyecto se realizó en varias etapas, siendo la primera el cálculo del agua a evaporar, este valor se obtuvo del dato de molienda que es de 20 000 toneladas (18 181,82 Tm) y el aumento del agua de imbibición es del 5%, dando el valor de 177,29 lb/s (80,59 kg/s) de agua. Este valor se tomó como base para calcular el calor necesario en su evaporación y que es de 43 977,96 kcal/s (184 126,88 kJ/s), a continuación se calculó el coeficiente de transferencia de calor a partir de la fórmula No. 6 dando un valor de 3 570,62 W/m<sup>2</sup> K.

El siguiente paso fue calcular el área de transferencia de calor necesaria para poder evaporar el agua agregada, el valor obtenido a partir de la fórmula No. 4, y el resultado es de 30 600 pies cuadrados (2 844,29 metros cuadrados) de área de transferencia de calor.

El número de tubos de la calandria del evaporador se calculó de la ecuación No. 7 y el resultado obtenido fue de 7 930 tubos de 1,5 pulgadas (0,038 metros) de diámetro externo y 10 pies (3,049 metros) de largo.

Los datos anteriores aplicados a la ecuación No. 14 dieron como resultado que el diámetro de la calandria es de 16,168 pies (4,93 metros), se tomó este

valor como base para las dimensiones del diámetro del cuerpo, del fondo y de la cúpula del evaporador.

A partir de la ecuación No. 16 se calculó el diámetro de entrada y salida de jugo, salida de condensados dando los siguientes resultados: diámetro tubería de entrada de jugo igual a 10 pulgadas (0,254 metros), diámetro de tubería de salida de jugo igual a 12 pulgadas (0,305 metros) y diámetro de tubería de salida de condensados igual a 6 pulgadas (0,152 metros).

El diámetro de las tuberías de vapor se calculó a partir de la ecuación No. 16, se obtuvieron los siguientes resultados: diámetro de tubo de entrada de vapor de 20 psi (137,90 kPa) igual a 30 pulgadas (0,762 metros), y el diámetro de salida de vapor de 10 psi (68,95 kPa) igual a 42 pulgadas (1,07 metros).

“El diámetro de la tubería de salida de gases incondensables se tomó de 1 pulgada (0,0254 metros), dato tomado de la referencia bibliográfica, de la estandarización de los equipos y de la experiencia.”<sup>21</sup>

En la segunda etapa teniendo las dimensiones del evaporador, se calculó el material necesario para su construcción, tomando en cuenta las dimensiones y cantidades en que los proveedores despachan el material, el tipo material utilizado en otros evaporadores similares y la experiencia del Ingeniero a cargo del proyecto. Este material esta tabulado en la tabla II y tiene un costo de Q. 6 381 831,08. Es importante que la solicitud y compra de este material se realice con dos meses de anticipación al inicio del montaje del equipo, porque la mayoría son materiales de importación y el tiempo de entrega va desde 3 hasta 12 semanas, entre estos están los más importantes como son los tubos de la calandria y la lámina de A.I. para los espejos del evaporador.

---

<sup>21</sup> HUGOT, Emile. Manual para Ingenieros Azucareros. 339 - 383 p.

A continuación en la tercera etapa se analizó el proyecto para determinar todas las actividades del montaje, los tiempos de realización y el personal necesario para el montaje, en la tabla II están tabuladas todas actividades y sus tiempos de realización tomando como base la figura 1, en donde se especifican todas las secciones del evaporador convencional. Después de hacer la lista de las actividades y colocar los tiempos de realización, se determinó la ruta crítica del montaje, las actividades involucradas en esta son las siguientes: hacer las placas o espejos de la calandria, principalmente barrenar los agujeros donde van colocados los tubos, armar la calandria del evaporador, principalmente alinear los espejos y soldarlos; armar el evaporador, en la actividad de colocar la calandria sobre la estructura y soldar todas las secciones entre ellas; colocar los tubos de la calandria y expandirlos y realizar las pruebas hidrostáticas de la calandria y el cuerpo del evaporador para encontrar fallos en las soldaduras. Estas son las actividades principales que determinan el tiempo de trabajo para el montaje del evaporador y que es de 180 días.

En la tabla II se presenta el personal que se utilizó en el montaje del evaporador, determinado a través del programa Project Manager y de la experiencia de los Ingenieros en otros proyectos, en esta tabla están incluidos los datos de salarios y prestaciones, dando un total de Q. 517 017,25. Datos obtenidos de la oficina de contabilidad y la de Recursos Humanos.

El costo total del evaporador se calculó a partir de la suma de los costos de materiales y mano de obra; dando un costo total para el proyecto de Q. 6 975 336,01.

La siguiente etapa consistió en hacer el procedimiento de arranque del evaporador descrito en la sección 4.6., y los resultados obtenidos de la operación están tabulados en la tabla III, comprenden datos del 01/01/2011 al 30/01/2011 de la zafra 2010-2011 y datos del 01/01/2012 al 30/01/2012 de la zafra 2011-2012. Al hacer el análisis de los datos, utilizando un análisis de varianza da como resultado que  $\alpha = 0,052$  y del criterio de este tratamiento de datos se determinó que es válida la hipótesis nula, esto indica que no hay diferencia significativa de los valores de Brix de la meladura entre los datos de las zafras analizadas por lo que el evaporador diseñado, calculado, construido y puesto en marcha es el adecuado a este proceso.

## CONCLUSIONES

1. Un evaporador de 30 600 pies cuadrados (2 844,29 metros cuadrados) de superficie de transmisión de calor es el que cumple con la operación de evaporar el aumento en 5 % de agua en molinos y está de acuerdo a la estandarización del equipo y al espacio existente en la estación de evaporación del ingenio azucarero.
2. Al evaluar estadísticamente la operación del equipo diseñado, calculado y construido a través del análisis de los datos del brix de la meladura de la zafra 2010-2011 vs zafra 2011-2012, de acuerdo al Método de Análisis de Varianza se obtuvo un valor de  $\alpha = 0,052$ , que confirmó la hipótesis nula, que confirma que el evaporador de 30 600 pies cuadrados (2 844,29 metros cuadrados) de superficie de transmisión de calor es el adecuado para los requerimientos de la operación.
3. Los materiales calculados y que se utilizaron para la construcción del evaporador de 30 600 pies cuadrados (2 844,29 metros cuadrados) de superficie de transmisión de calor, tomando en cuenta la estandarización del equipo, tienen un costo de Q. 6 381 831,08.
4. El costo total del proyecto de ampliación en la etapa de evaporación del ingenio azucarero es de Q. 6 975 336,01 y tuvo una duración en el montaje y construcción de 180 días.





## RECOMENDACIONES

1. Es importante estandarizar las dimensionales utilizadas en el ingenio azucarero de acuerdo al sistema internacional, porque en el ingenio se utilizan unidades de todos los sistemas, según el origen de los equipos, aunque el programa utilizado en la automatización de los procesos permite utilizar las unidades que el usuario necesite.
2. Se debe tomar en cuenta el tiempos para obtener los materiales necesarios para los proyectos, porque generalmente estos son importados y tardan entre 4 y 12 semanas en ser surtidos, esto puede ocasionar un atraso en las actividades de los montajes futuros en el ingenio azucarero.
3. Para la operación del evaporador se deben seguir los pasos del procedimiento propuesto y mantener estables las variables del proceso (alimentación de jugo, alimentación de vapor y nivel) para que la operación sea eficiente y continua.
4. El personal técnico que está a cargo de los proyectos del ingenio azucarero deben seguir siendo guatemaltecos porque han demostrado la capacidad y compromiso que tienen al realizar de manera satisfactoria todos los proyectos de mejora y ampliación que se han propuesto.



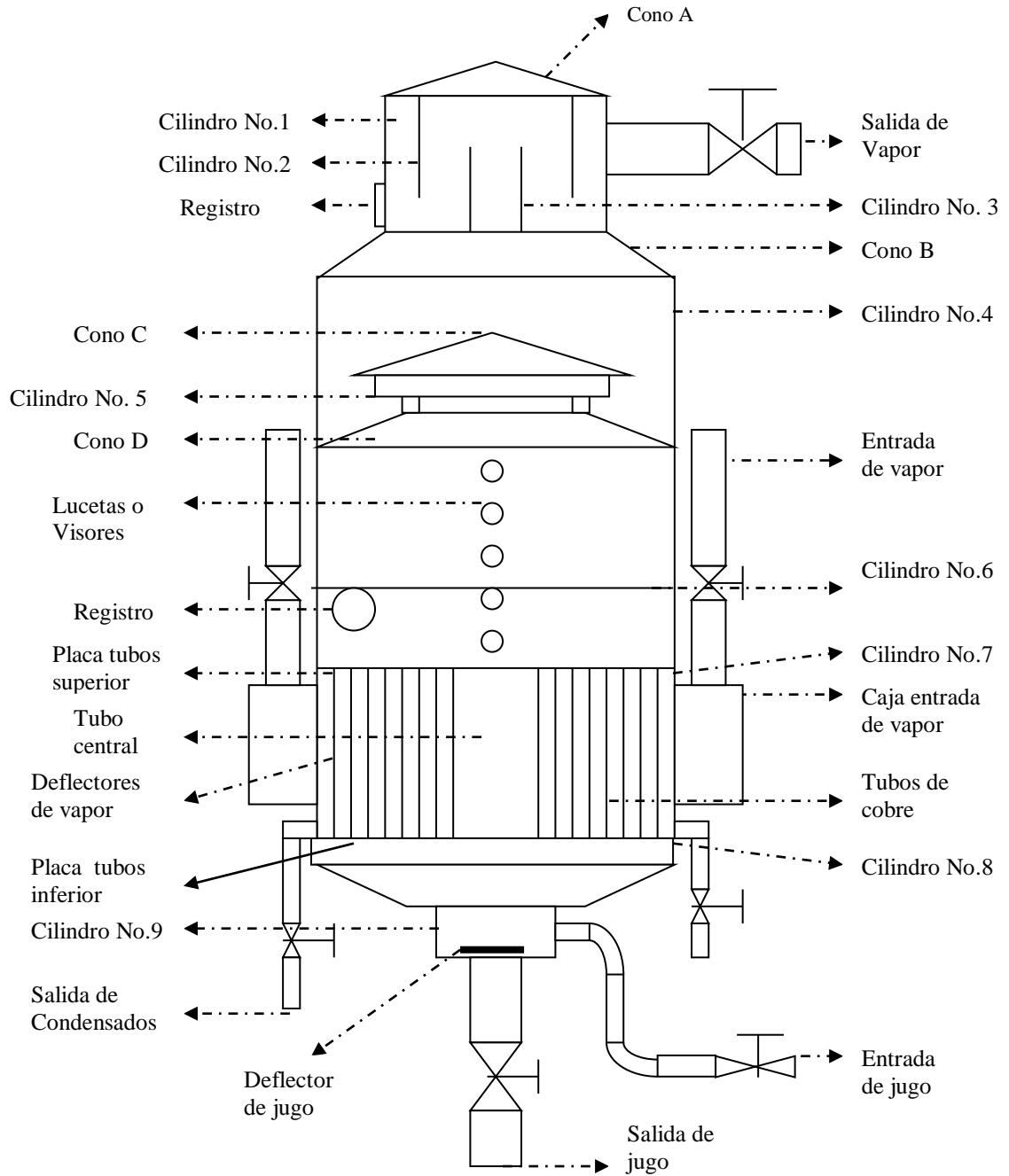
## BIBLIOGRAFÍA

1. BARTENS, Albert. *Manual de energía para fábricas de azúcar*. 2a ed. México D.F.: Geplacea, GTZ, 2012. 848 .p
2. CHEN, James. *Manual del azúcar de caña*. México: Limusa, 2006. 1220 p.
3. DE ARMAS, Mario. *Modulación y simulación de procesos con un enfoque energético en el área de evaporación y calefacción*. México: 7mp. Seminario internacional de Turbo maquinaria, 1998. 19 p.
4. *El Ocio de los Santos. Análisis de varianza*. [en línea]. [Consulta: 19 de mayo de 2012.] :  
<<http://www.elosidelosantos.com/sergiman/andeva.htm>>.
5. *Evaluación de proyectos: la programación de proyectos*. [en línea]. [Consulta: 12 de junio de 2012]:  
<<http://www.geocities.com/evalproyact/capitulo4.htm>>.
6. FCA – UNAM. *PERT*. [en línea]. [Consulta: 24 de junio de 2013]:  
<<http://www.unamosaapuntes.tripod.com/mkt/pert/htm>>.
7. HUGOT, Emile. *Manual para ingenieros azucareros*. México: Continental, 1964. 1870 p.

8. LOPEZ, Ferrer. *Manual Práctico de maquinaria y aparatos en los ingenios de azúcar de caña*. 2a ed. La Habana, Cuba: Cultural, 1949. 876 p.
9. MENDEZ, José. *Teoría de la producción y los costos*. [en línea]. [Consulta: 5 de mayo de 2012]:  
<<http://www.monografias.com/trabajos/tprodcost/.shtml>>.
10. VILLAGRAN, Rodrigo. *El protocolo en los proyectos de investigación científica*. Guatemala: Centro Universitario del Sur, Universidad de San Carlos de Guatemala, 1996. Documento 93-6-11-057. 15 p.

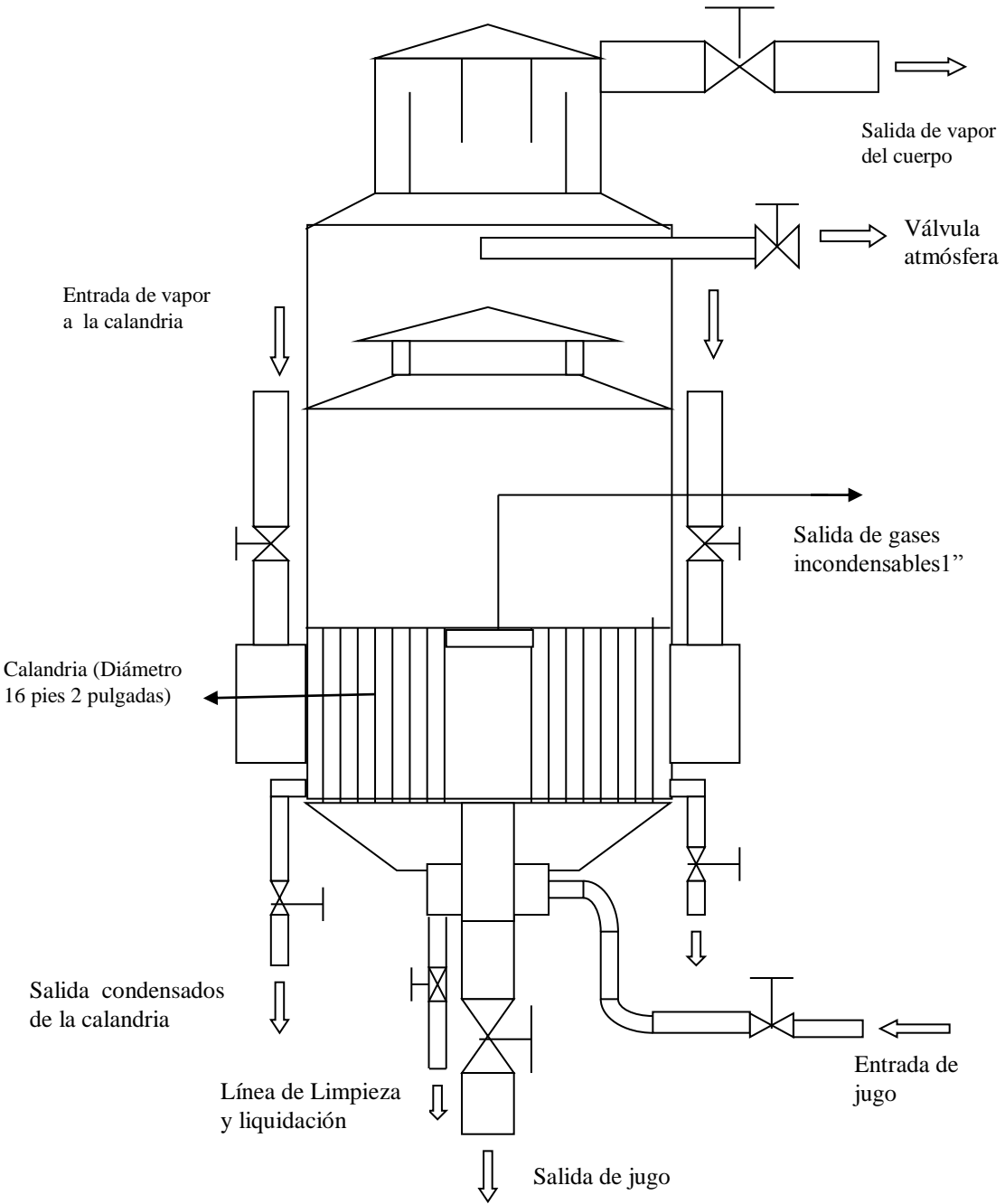
# APÉNDICE

## Partes de un evaporador Convencional



Fuente: elaboración propia con programa Word 2010.

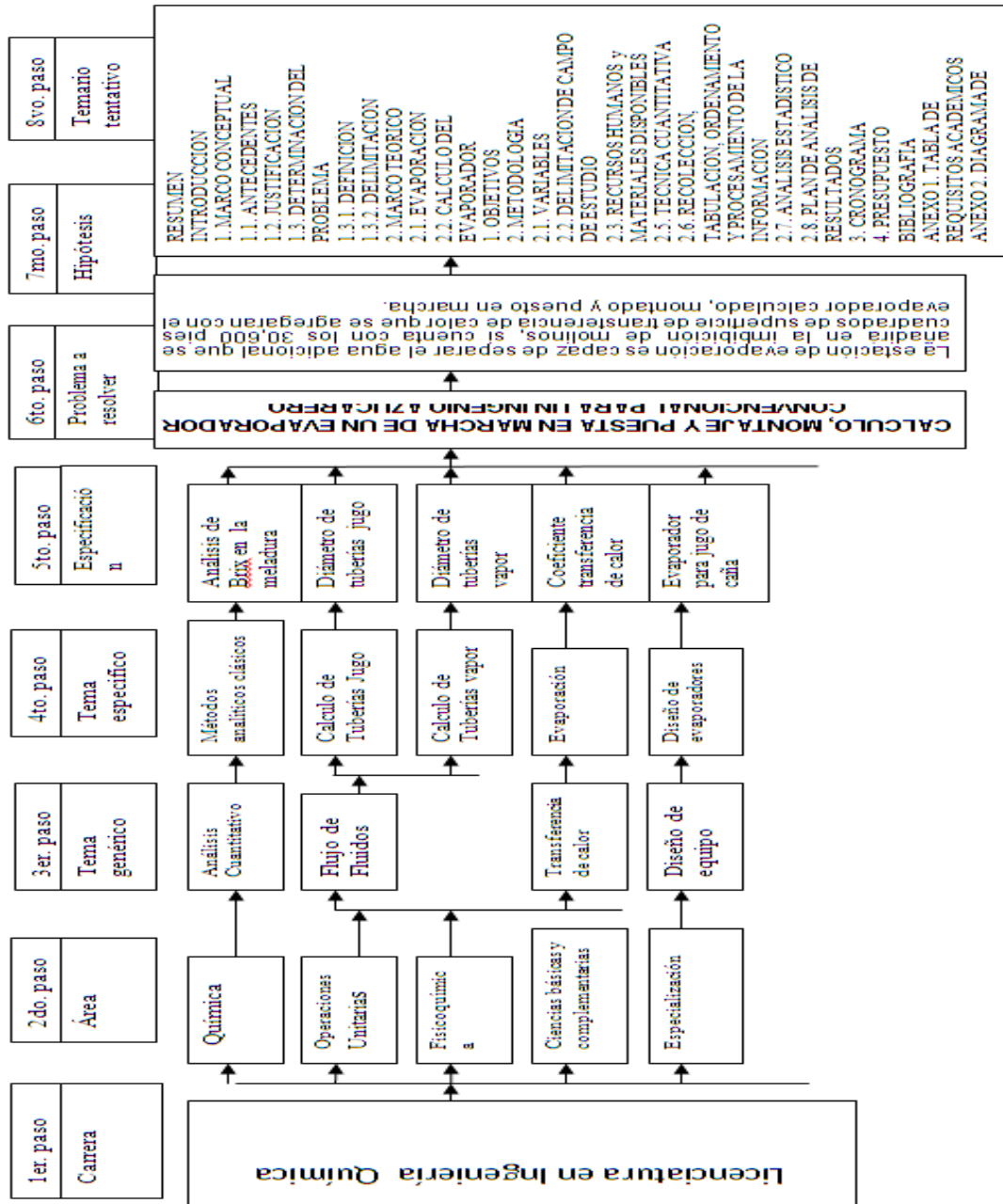
Entradas y salidas de un evaporador convencional



Fuente: elaboración propia con programa Word 2010.

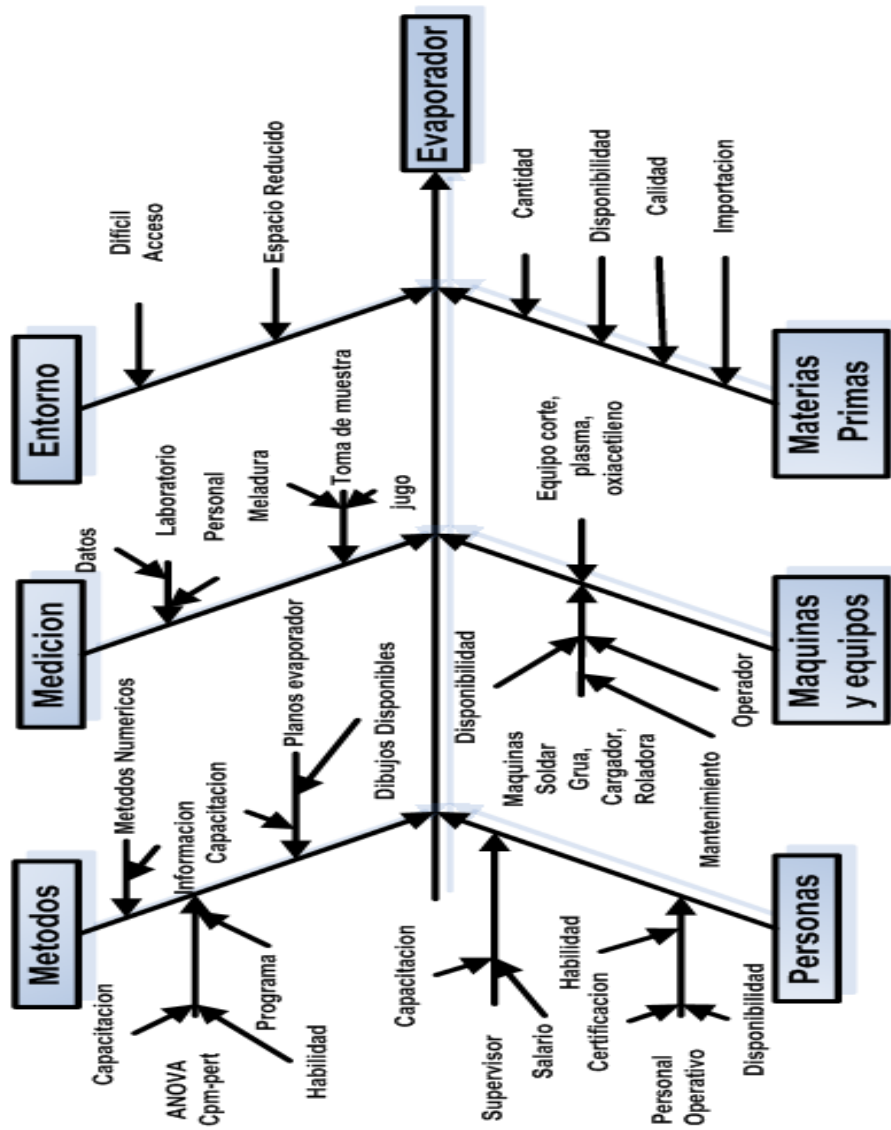
# DISEÑO Y EVALUACIÓN DE UN EVAPORADOR CONVENCIONAL PARA UN INGENIO AZUCARERO

## Procedimiento para iniciar la tesis en la carrera de Ingeniería Química





**DISEÑO Y EVALUACIÓN DE UN EVAPORADOR CONVENCIONAL PARA UN INGENIO AZUCARERO**

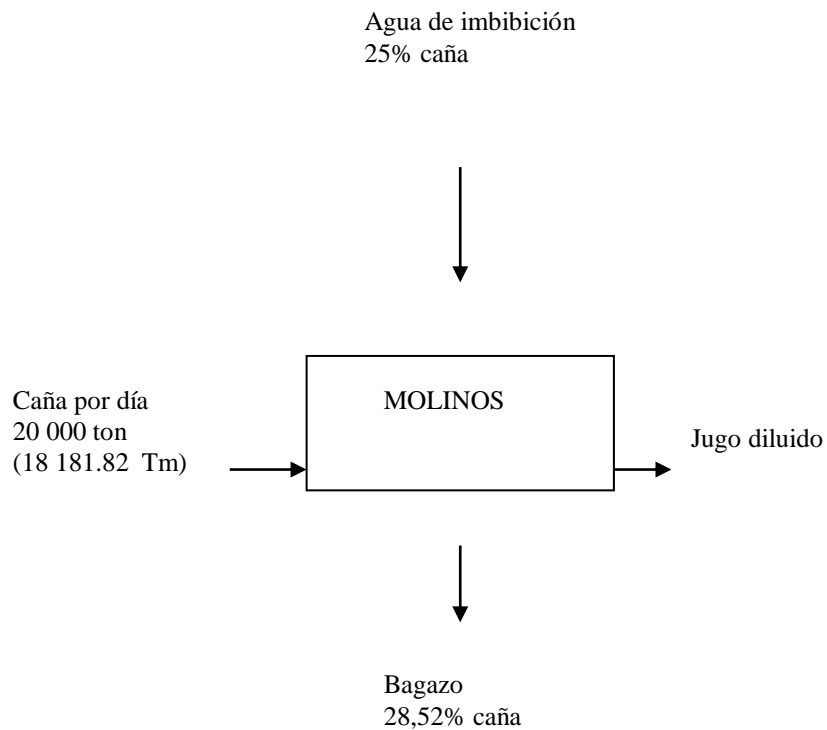


## ANEXO

### Cálculo del evaporador convencional

#### 1. Agua a evaporar

El ingenio azucarero muele diariamente 20 000 toneladas (18 181,82 Tm) de caña diariamente, a partir de este dato se determinó la cantidad de jugo claro que se alimenta a la estación de evaporación, para ello se realizó el balance de materiales en la etapa de extracción de jugo (molinos):



## 2. Balance de materiales

Ton de caña por día + Agua de imbibición = Jugo diluido + Bagazo

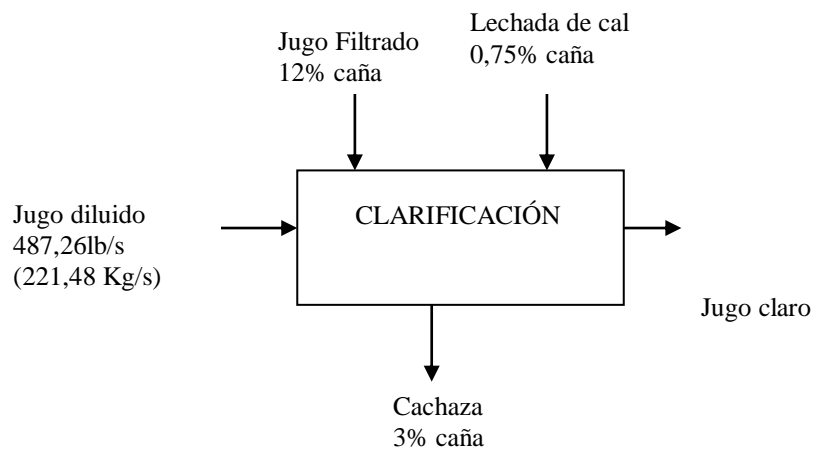
Sustituyendo los valores en el balance anterior se tiene que:

$$20\ 000\text{ton/día} + 0,30(20\ 000)\ \text{ton/día} = \text{Jugo diluido} + 0,2475(20\ 000)\ \text{ton/día}$$

Despejando el Jugo diluido se tiene que:

$$\text{Jugo diluido} = 487,26\ \text{lb/s}\ (221,48\ \text{Kg/s})$$

En el proceso de fabricación de azúcar se tiene que la siguiente etapa es la clarificación del jugo, el balance de materiales dio lo siguiente:



Jugo Diluido + Jugo filtrado + Lechada de cal = Cachaza + jugo claro

$$487,26 \text{ lb/s} + 0,12(462,96) + 0,0075 (462,96) = 0,03 (462,96) + \text{jugo claro}$$

Se obtuvo que la cantidad de jugo claro que sirve de materia prima a la etapa de evaporación es:

$$\text{Jugo claro} = 532,40 \text{ lb/s (242 Kg/s)}$$

El evaporador que se calcula recibe el jugo claro con una densidad de 12,50 °Brix, y debe salir con una densidad de 17,96 °Brix, utilizando las formulas 1, 2 y 3, se obtiene:

$$\text{Agua a evaporar} = 177,29 \text{ lb/s (80,59 Kg/s)}$$

### 3. Cálculo de la superficie de intercambio de calor

Para calcular el área de transferencia de calor se utiliza la ecuación número 4, que es la siguiente:

$$A = \frac{Q}{K \cdot \Delta v_W}$$

Para poder operar la ecuación anterior primero se tiene que calcular el calor transferido Q, para ello utilizamos la ecuación número 5.

$$Q = W \cdot r$$

$$Q = 80,59 \text{ Kg/s (545,7 Kcal/Kg)}$$

$$Q = 43\,977,96 \text{ Kcal/s (184\,126,92 kJ)}$$

A continuación se calcula el Coeficiente de transferencia de calor K, para ello se utiliza la ecuación 6 que es la siguiente:

$$K = 0,613 (100 - B_1^{Jc}) (v_v - 54) [W / (m^2 \cdot K)]$$

$$K = 0,613 (100 - 17,96) (125 - 54) [W / (m^2 \cdot K)]$$

$$K = 0,613 (82,04) (71) [W / (m^2 \cdot K)]$$

$$K = 3570,62 [W / (m^2 \cdot K)]$$

Teniendo todos los valores se calcula el área de transferencia de calor utilizando la ecuación

$$A = \frac{Q}{K \cdot \Delta v_w}$$

$$A = \frac{43\,977,96 \text{ Kcal/s}}{(3\,570,62 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}) (24,65 \text{ }^\circ\text{C})}$$

$$A = 2\,844,29 \text{ metro cuadrado}$$

$$A = 30\,600 \text{ pie cuadrado}$$

#### 4. Cálculo de la calandria

##### 4.1. Cálculo del número de tubos

Para calcular el número de tubos, se toma en primer lugar la estandarización del equipo en el ingenio azucarero, para ello tenemos que los

tubos utilizados tienen las siguientes medidas: Diámetro 1 ½ pulgada (0,038 m), largo 10 pies (3,049 m).

Para calcular el número de tubos se utiliza la ecuación No. 7, y es la siguiente:

$$N_T = A/A_T$$

$$N_T = 30\,600 \text{ pie}^2 / 3,859 \text{ pie}^2 / \text{ tubo}$$

$$N_T = 7\,929,52$$

$$N_T = 7\,930 \text{ tubos}$$

La calandria está formada por 7 930 tubos.

#### **4.2. Cálculo de la distancia entre tubos de la calandria**

Se utilizó la ecuación 8, y se le da un valor a promedio a  $K_e = 0.5$  de donde:

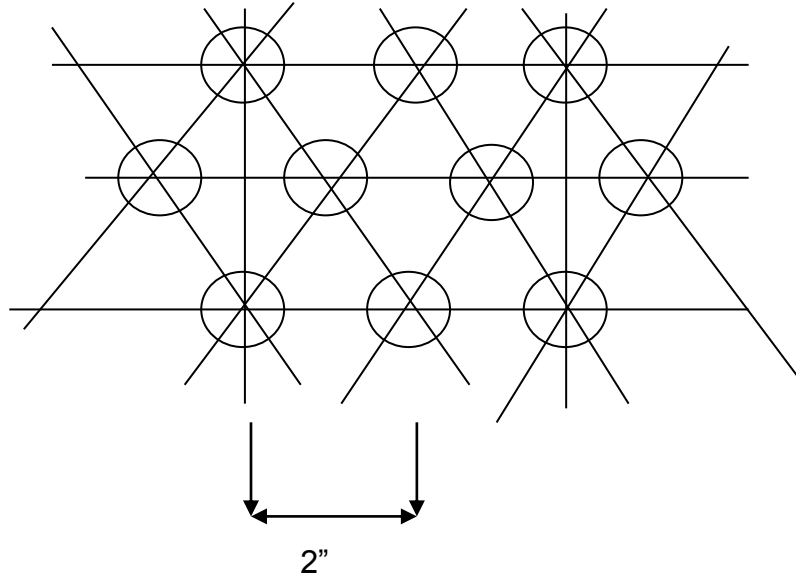
$$P = 0,952 d_e / (K_e)^{1/2}$$

$$P = 0,952 d_e / (0,5)^{1/2}$$

$$P = 0,952 (1,5) / (0,5)^{1/2}$$

$$P = 2 \text{ pulgadas (0,051 m)}$$

La distancia entre los centros de los tubos es de 2 pulgadas



#### 4.3. Cálculo del diámetro de la calandria

El diámetro de la calandria se obtiene de la ecuación 14, al sustituir los valores se tiene que:

$$D = (4S_i / \pi k_i \alpha \beta)^{1/2}$$

$$D = (4(97,31 \text{ pie}^2) / (3,1416)(0,474))^{1/2}$$

$$D = (389,26 / 1,489)^{1/2}$$

$$D = (261,42)^{1/2}$$

$$D = 16 \text{ 168 pies } (4,93 \text{ m})$$

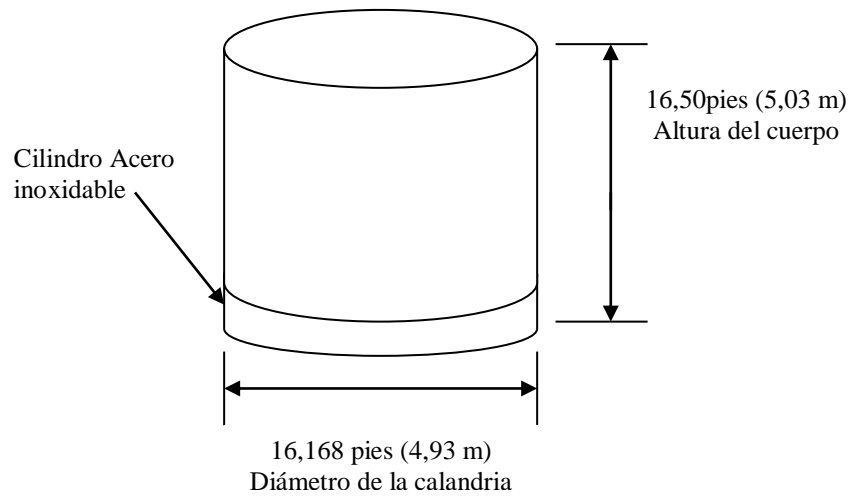
#### 5. Cálculo del cuerpo del evaporador

El cuerpo del evaporador es 1,5 a 2 veces el tamaño de la calandria, para este caso el tamaño de la calandria es el largo efectivo de los tubos de de la calandria en este caso es de 10 pies (3,049 m), entonces tomando un valor

10% arriba del mínimo y que no aumente el costo considerablemente, se toma 1,65 veces el tamaño de la calandria, por lo que se obtiene que:

$$\text{Altura del Cuerpo} = 1,65 (10 \text{ pies})$$

$$\text{Altura del Cuerpo} = 16,50 \text{ pies } (5,03 \text{ m})$$



## 6. Cálculo de la cúpula del evaporador

“Las proporciones más adecuadas para los separadores son las siguientes”<sup>22</sup> :

$$d = 1,00$$

$$D = 2,08$$

$$M = 1,67$$

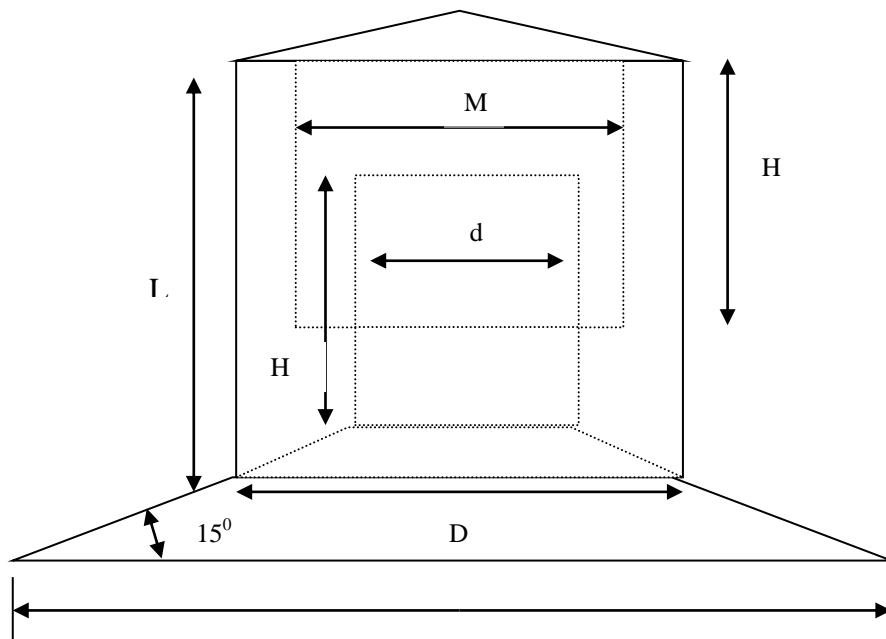
$$H = 0,84$$

$$L = 1,00$$

---

<sup>22</sup> Referencia 2





La salida del evaporador se calcula de acuerdo al agua a evaporar en el proceso y el flujo másico es de 177,29 lb/s (80,59 Kg/s), a partir de este dato utilizamos las ecuaciones 16 y 17 para determinar el volumen de vapor por segundo y el diámetro del tubo a utilizar, de donde encontramos que el flujo de vapor es:

$$q = 1,1 \text{ p/g}$$

$$q = 1,1(80,40 \text{ Kg/s}) / (1,34 \text{ Kg/m}^3)$$

$$q = 66,00 \text{ m}^3/\text{s}$$

y el diámetro de la salida de vapor del cuerpo del evaporador a la cúpula ( $d$ ):

$$d = \left[ \frac{F \text{ m}^3/\text{s}}{\pi V \text{ m/s} / 4} \right]^{1/2}$$

$$d = \left[ \frac{66,00 \text{ m}^3/\text{s}}{\pi \cdot 25 \text{ m/s} / 4} \right]^{1/2}$$

$d = 1,83 \text{ m}$  equivalente a 6 pies de diámetro.

Con el diámetro de la salida de vapor del cuerpo a la cúpula se aplicaron las relaciones propuestas en la sección 2.2.6. Para tener las dimensiones del separador de arrastres y quedo con las medidas siguientes:

$d = 6$  pies de diámetro. (1,83 m)

$D = 12,5$  pies de diámetro (3,811 m)

$M = 10$  pies de diámetro (3,049 m)

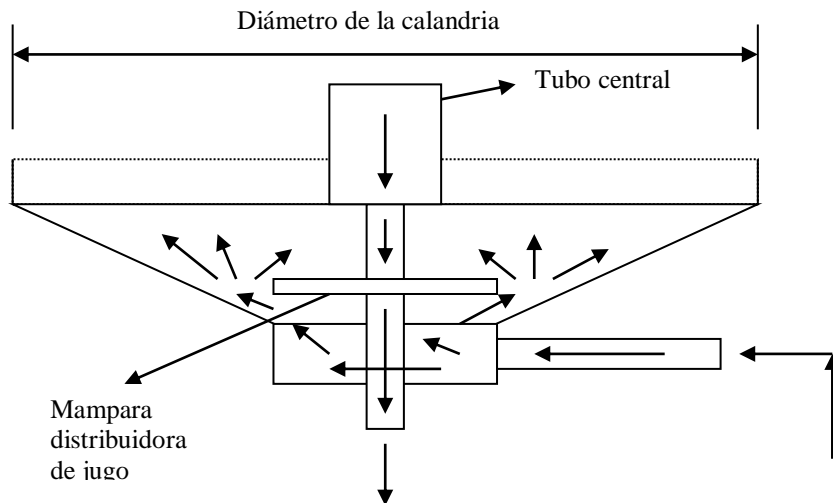
$H = 5$  pies de alto (1,524 m)

$L = 6$  pies de alto (1,83 m)

## 7. Fondo del evaporador

El fondo del evaporador es un cono truncado, el cual va pegado a el cuerpo por un anillo de 6 (0,152 m) a 10 pulgadas (0,254 m), este anillo va con el fin de poder trabajar en el fondo de la calandria a la hora de que ocurran

desperfectos en los tubos de la calandria. En este caso el fondo del evaporador tiene un anillo de 9 pulgadas (0,229 m), que con base en la experiencia se ha visto que es suficiente espacio para poder reparar la calandria del evaporador.



El diámetro del fondo del evaporador es el mismo que el de la calandria, porque este le sirve de tapadera inferior al evaporador.

Las medidas son las siguientes:  $D = 16$  pies 2 pulgadas (4,93 m). Y el ángulo del cono es de 15 grados.

## 8. Cálculo entrada de jugo del evaporador

$$q = 1,1 \text{ p/g}$$

$$q = 1,1(242 \text{ Kg/s}) / (1\ 048,85 \text{ Kg/m}^3)$$

$$q = 0,25 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$d = \left[ \frac{F}{\pi V/4} \right]^{1/2}$$

$$d = \left[ \frac{0,25 \text{ m}^3/\text{s}}{\pi(5 \text{ m/s})/4} \right]^{1/2}$$

$d = 0,25 \text{ m}$  equivalente a un tubo de 10 pulgadas de diámetro.

## 9. Cálculo salida de jugo del evaporador

$$q = 1,1 \text{ p/g}$$

$$q = 1,1(168,43 \text{ Kg/s}) / (1 \text{ 179,37 Kg/m}^3)$$

$$q = 0,16 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$d = \left[ \frac{F}{\pi V/4} \right]^{1/2}$$

$$d = \left[ \frac{0,16 \text{ m}^3/\text{s}}{\pi(2,5 \text{ m/s})/4} \right]^{1/2}$$

$d = 0,285 \text{ m}$ , equivalente a un tubo de 12 pulgadas de diámetro.

#### 10. Cálculo del tubo de la entrada de vapor a la calandria

Energía necesaria = 43 977,96 Kcal/s

Energía del Vapor = 2 713,0 Kjoule/Kg

Energía del Vapor = 647,98 Kcal/Kg

A partir de estos datos se calculó el flujo de vapor entrando al evaporador de la siguiente manera:

Flujo de vapor = 43 977,96 Kcal/s / 647 Kcal/Kg

Flujo de vapor = 67,97 Kg/s

Flujo de vapor = 67,97 Kg/s \* 0,7484 m<sup>3</sup>/Kg

Flujo de vapor = 50,87 m<sup>3</sup>/s

q = 1,1q

$$q = 1,1 * 50,87 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$q = 55,96 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$d = \left[ \frac{55,96 \text{ m}^3/\text{s}}{\pi (120 \text{ m/s})/4} \right]^{1/2}$$

$d = 1,065 \text{ m}$ , que es equivalente a 30 pulgadas de diámetro.

#### 11. Cálculo del tubo de salida de condensados de la calandria del evaporador

$$\text{Flujo de vapor} = 43\,977,96 \text{ Kcal/s}$$

$$\text{Energía del Vapor} = 2\,713,0 \text{ Kjoule/Kg}$$

$$\text{Energía del Vapor} = 647,98 \text{ Kcal/Kg}$$

$$\text{Flujo de vapor} = 43\,977,96 \text{ Kcal/s} / 647 \text{ Kcal/Kg}$$

$$\text{Flujo de vapor} = 67,97 \text{ Kg/s}$$

$$\text{Flujo de vapor} = 67,97 \text{ Kg/s} * 0,0010662 \text{ m}^3/\text{Kg}$$

$$\text{Flujo de vapor} = 0,7247 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$q = 1,1q$$

$$q = 1,1 * 0,7247 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$q = 0,07072 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$d = \left[ \frac{F}{\pi V/4} \right]^{1/2}$$

$$d = \left[ \frac{0,07072 \text{ m}^3/\text{s}}{\pi 5/4} \right]^{1/2}$$

$d = 0,134 \text{ m}$  equivalente a un tubo de 6 pulgadas de diámetro.

## 12. Cálculo de salida de vapor del evaporador

Utilizando la ecuación:

$$q = 1,1 p/g$$

Se tiene que el flujo de vapor es:

$$q = 1,1(80,40 \text{ Kg/s}) / (1,34 \text{ Kg/m}^3)$$

$$q = 66,00 \text{ m}^3/\text{s}$$

y el diámetro del tubo de salida de vapor de la cúpula del evaporador al siguiente efecto es:

$$d = \left[ \frac{F \text{ m}^3/\text{s}}{\pi V \text{ m/s} /4} \right]^{1/2}$$

$$d = \left[ \frac{66,00 \text{ m}^3/\text{s}}{\pi(75 \text{ m/s}) /4} \right]^{1/2}$$

d = 1,059 m, equivalente a un tubo de 42 pulgadas de diámetro

### 13. Salida de gases incondensables

Las dos cajas recolectoras de gases incondensables se colocaron a 90° de las entradas de vapor para lograr extraer el máximo de los gases incondensables que empuja el vapor al entrar en la calandria, las dimensiones de estas salidas es un tubo de A.I. de 1 pulgada (0,0254 m) de diámetro con su respectiva válvula para poder graduar el flujo de salida y evitar la pérdida de vapor.





