



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

**DISEÑO DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR DE CARCAZA Y TUBOS
PARA INGENIO TULULÁ, QUE PROPORCIONE UN BENEFICIO
ECONÓMICO A TRAVÉS DEL AHORRO DE VAPOR DE ESCAPE**

Julio César Salazar de León

Asesorado por el Ing. Miguel Arnoldo Lemus Gudiel

Guatemala, mayo de 2016

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR DE CARCAZA Y TUBOS
PARA INGENIO TULULÁ, QUE PROPORCIONE UN BENEFICIO
ECONÓMICO A TRAVÉS DEL AHORRO DE VAPOR DE ESCAPE**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

JULIO CÉSAR SALAZAR DE LEÓN

ASESORADO POR EL ING. MIGUEL ARNOLDO LEMUS GUDIEL

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO

GUATEMALA, MAYO DE 2016

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Raúl Eduardo Ticún Córdova
VOCAL V	Br. Henry Fernando Duarte García
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Estuardo Edmundo Monroy Benítez
EXAMINADOR	Ing. Jorge Emilio Godínez Lemus
EXAMINADOR	Ing. Víctor Manuel Monzón Valdez
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

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 DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR DE CARCAZA Y TUBOS PARA INGENIO TULULÁ, QUE PROPORCIONE UN BENEFICIO ECONÓMICO A TRAVÉS DEL AHORRO DE VAPOR DE ESCAPE

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha 12 de mayo de 2015.

Julio César Salazar de León

Guatemala, 22 de enero de 2016

Ingeniero
Carlos Salvador Wong Davi
Director de Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

Respetable Ing. Wong:

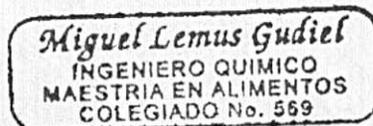
Por medio de la presente hago constar que he revisado y dado mi aprobación del informe final de trabajo de graduación del Ejercicio Profesional Supervisado (E.P.S) titulado **“DISEÑO DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR DE CARCAZA Y TUBOS PARA INGENIO TULULÀ, QUE PROPORCIONE UN BENEFICIO ECONÒMICO A TRAVÈS DEL AHORRO DE VAPOR DE ESCAPE”** de el estudiante de Ingeniería Química Julio Cesar Salazar de León quien se identifica con el carné número 8511263.

Sin otro particular me suscribo de usted.

Atentamente,



Ing. Qco. Miguel Arnoldo Lemus Gudiel
Colegiado No.569
Asesor





Guatemala, 28 de octubre de 2015.
Ref.EPS.DOC.733.10.15.

Ing. Silvio José Rodríguez Serrano
Director Unidad de EPS
Facultad de Ingeniería
Usac.

Ing. Rodríguez Serrano:

Por este medio atentamente le informo que como Asesor-Supervisor de la Práctica del Ejercicio Profesional Supervisado (E.P.S.), del estudiante universitario **Julio César Salazar de León** de la Carrera de Ingeniería Química, con carné No. **8511263**, procedí a revisar el informe final, cuyo título es **“DISEÑO DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR DE CARCAZA Y TUBOS PARA INGENIO TULULÁ, QUE PROPORCIONE UN BENEFICIO ECONÓMICO A TRAVÉS DEL AHORRO DE VAPOR DE ESCAPE”**.

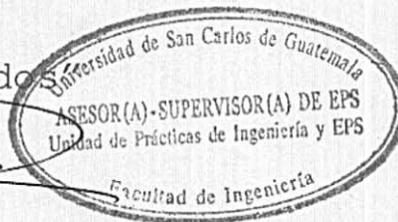
En tal virtud, **LO DOY POR APROBADO**, solicitándole darle el trámite respectivo.

Sin otro particular, me es grato suscribirme.

Atentamente,

“Id y Enseñad a Todos”

Ing. Alejandro Redinos
Asesor-Supervisor de EPS
Área de Ingeniería Química



c.c. Archivo
AR/ra



Guatemala, 28 de octubre de 2015.
Ref.EPS.D.572.10.15.

Ing. Victor Manuel Monzón Valdéz
Director Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería
Presente

Estimado Ingeniero Monzón Valdéz.

Por este medio atentamente le envío el informe final correspondiente a la práctica del Ejercicio Profesional Supervisado, (E.P.S) titulado **"DISEÑO DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR DE CARCAZA Y TUBOS PARA INGENIO TULULÁ, QUE PROPORCIONE UN BENEFICIO ECONÓMICO A TRAVÉS DEL AHORRO DE VAPOR DE ESCAPE"** que fue desarrollado por el estudiante universitario Julio César Salazar de León, quien fue debidamente asesorado y supervisado por el Ingeniero **Alejandro Recinos**.

Por lo que habiendo cumplido con los objetivos y requisitos de ley del referido trabajo y existiendo la aprobación del mismo por parte del Asesor-Supervisor de EPS, en mi calidad de Director apruebo su contenido solicitándole darle el trámite respectivo.

Sin otro particular, me es grato suscribirme.

Atentamente,
"Id y Enseñad a Todos"

Ing. Silvio José Rodríguez Serrano
Director Unidad de EPS

SJRS/ra





Guatemala, 05 de abril de 2016.
Ref. EI.Q.TG-IF.020.2016.

Ingeniero
Carlos Salvador Wong Davi
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero Wong:

Como consta en el registro de evaluación del informe final EI.Q-PRO-REG-007 correlativo **101-2014** le informo que reunidos los Miembros de la Terna nombrada por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del:

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADUACIÓN
-Modalidad Ejercicio Profesional Supervisado-

Solicitado por el estudiante universitario: **Julio Cesar Salazar De León**.
Identificado con número de carné: **0085-11263**.
Previo a optar al título de **INGENIERO QUÍMICO**.

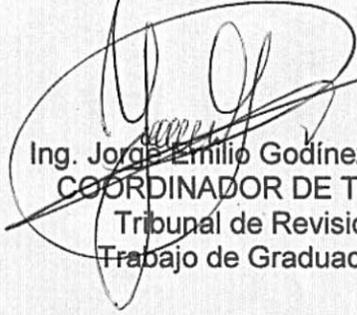
Siguiendo los procedimientos de revisión interna de la Escuela de Ingeniería Química, los Miembros de la Terna han procedido a **APROBARLO** con el siguiente título:

DISEÑO DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR DE CARCAZA Y TUBOS
PARA INGENIO TULULÁ, QUE PROPORCIONE UN BENEFICIO ECONÓMICO
A TRAVÉS DEL AHORRO DE VAPOR DE ESCAPE

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por el Ingeniero Químico: **Miguel Arnoldo Lemus Gudiel**.

Habiendo encontrado el referido informe final del trabajo de graduación **SATISFACTORIO**, se autoriza al estudiante, proceder con los trámites requeridos de acuerdo a las normas y procedimientos establecidos por la Facultad para su autorización e impresión.

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"


Ing. Jorge Emilio Godínez Lemus
COORDINADOR DE TERNA
Tribunal de Revisión
Trabajo de Graduación



C.c.: archivo





Ref.EIQ.TG.032.2016

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 Ejercicio Profesional Supervisado (**EPS final**) del estudiante **JULIO CÉSAR SALAZAR DE LEÓN** titulado: **"DISEÑO DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR DE CARCAZA Y TUBOS PARA INGENIO TULULÁ, QUE PROPORCIONE UN BENEFICIO ECONÓMICO A TRAVÉS DEL AHORRO DE VAPOR DE ESCAPE"** Procede a la autorización del mismo, ya que reúne el rigor, la secuencia, la pertinencia y la coherencia metodológica requerida.

"Id y Enseñad a Todos"

Ing. Carlos Salvador Wong Davi
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química



Guatemala, mayo de 2016

Cc: Archivo
CSWD/ale



ACAAI



Universidad de San Carlos
de Guatemala

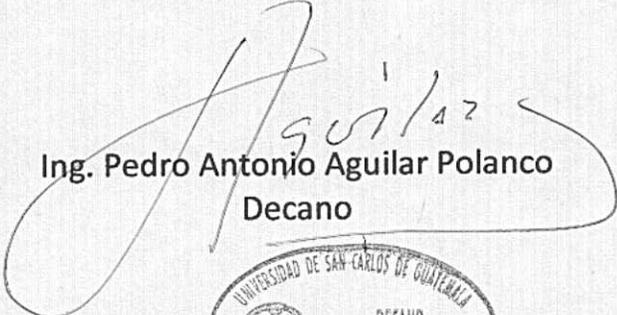


Facultad de Ingeniería
Decanato

DTG. 246.2016

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al Trabajo de Graduación titulado: **DISEÑO DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR DE CARCAZA Y TUBOS PARA INGENIO TULULÁ, QUE PROPORCIONE UN BENEFICIO ECONÓMICO A TRAVÉS DEL AHORRO DE VAPOR DE ESCAPE**, presentado por el estudiante universitario: **Julio César Salazar de León**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:


Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Decano

Guatemala, mayo de 2016



/gdech

ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Por protegerme y bendecirme en cada momento de mi vida.
- Mi papá** José Alfredo Salazar (q. e. p. d.), por enseñarme mis primeras letras y guiarme con el ejemplo por el camino correcto. Siempre lo llevo en mi corazón.
- Mi mamá** Petrona de León (q. e. p. d.), por su dedicación y amor incondicional para hacerme una persona de bien. Siempre la llevo en mi corazón.
- Mi esposa** Elvi Lisseth Quiñonez de Salazar, por sus inagotables esfuerzos para darnos lo mejor, pues con su ejemplo y amor nos enseña a mis hijos y a mí a ser mejores personas.
- Mis hijos** Julio César y José Alfredo Salazar Quiñonez, por ser la inspiración de todo lo que hago. Una auténtica bendición de Dios.
- Mis hermanos** Vilma, Alba y especialmente a Dorita Aldina (q. e. p. d.) y Lisandro Aníbal Salazar de León (q. e. p. d.), por su apoyo de toda la vida.

AGRADECIMIENTOS A:

Dios	Fuente inagotable de fortaleza.
Mis padres	José Alfredo Salazar (q. e. p. d.) y Petrona de León (q. e. p. d.), por todo su amor, esfuerzos y enseñanzas para que siempre estuviera bien.
Mi esposa e hijos	Por su comprensión y apoyo en todo momento. Son la motivación de todos los días de mi vida.
Universidad de San Carlos de Guatemala	Por darme la oportunidad de convivir en sus aulas y prepararme profesionalmente.
Facultad de Ingeniería	Especialmente a la Escuela de Ingeniería Química, por darme las herramientas necesarias para alcanzar mis metas.
Ingenio Tululá	Por darme la oportunidad de desarrollarme profesionalmente.
Ingeniero Erick Orellana	Por darme su apoyo y las facilidades para la realización de este trabajo.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
RESUMEN.....	XV
OBJETIVOS.....	XVII
Hipótesis	XVIII
INTRODUCCIÓN	XIX
1. ANTECEDENTES	1
2. MARCO TEÓRICO.....	3
2.1. Generalidades del proceso de extracción y recuperación de azúcar.....	3
2.2. División general del proceso.....	5
2.2.1. Descarga y preparación de la caña	5
2.2.2. Molienda	5
2.2.3. Producción de vapor.....	6
2.2.4. Calentamiento y clarificación	8
2.2.5. Evaporación.....	11
2.2.6. Cristalización	12
2.2.7. Envasado.....	13
2.3. Fundamentos teóricos	14
2.3.1. Temperatura	14
2.3.2. Presión	14
2.3.3. Calor	15

2.3.4.	Energía.....	15
2.3.5.	Determinación de fórmulas.....	15
2.3.6.	Capacidad calorífica de soluciones azucaradas (Cp)	15
2.3.7.	Balance de energía para calentamiento del jugo	16
2.3.8.	Entalpía (H)	16
2.3.9.	Coeficiente global de transferencia de calor (K).....	17
2.3.10.	Área de transferencia	19
2.3.11.	Número de tubos (Nt)	19
2.3.12.	Área de flujo	20
2.3.13.	Caída de presión	21
3.	DISEÑO METODOLÓGICO.....	23
3.1.	Variables	23
3.1.1.	Variables de diseño	23
3.1.2.	Variables de proceso.....	23
3.2.	Delimitación de campo de estudio	24
3.3.	Recursos humanos disponibles	24
3.4.	Recursos materiales disponibles.....	24
3.5.	Técnica de recolección y ordenamiento de la información.....	25
4.	RESULTADOS.....	27
4.1.	Cálculo de la capacidad calorífica del jugo clarificado	27
4.2.	Cálculo del calor requerido en el sistema.....	27
4.3.	Cálculo de la cantidad de vapor necesaria en el sistema.....	27
4.4.	Cálculo del coeficiente de transmisión de calor	28
4.5.	Cálculo del área de transferencia.....	29
4.6.	Cálculo del número de tubos.....	30
4.7.	Caída de presión	31

4.8.	Arreglo de tubos	32
4.9.	Diámetro interno de la carcaza	34
4.10.	Baffles.....	36
4.11.	Plantilla de barrenado.....	39
4.12.	Cálculo del beneficio económico	41
4.13.	Planos generales de diseño	42
5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	47
6.	LOGROS OBTENIDOS	49
	CONCLUSIONES	51
	RECOMENDACIONES.....	53
	BIBLIOGRAFÍA.....	55
	APÉNDICES	57
	ANEXOS	69

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Proceso general de producción de azúcar en Ingenio Tululá.....	4
2.	Diagrama general de distribución de vapor en la fábrica	7
3.	Esquema general de flujo en un intercambiador de calor de carcaza y tubos en Ingenio Tululá	9
4.	Diagrama de flujo del jugo en el sistema de calentadores del Ingenio Tululá.....	10
5.	Diferentes arreglos de tubería en un intercambiador de calor de carcaza y tubos	33
6.	Ejemplo de colocación de baffles para el barrenado.....	36
7.	Baffles segmentados y su respectivo corte	37
8.	Espejos frontales anterior y posterior de 12 pases del intercambiador de calor.....	38
9.	Plantilla de barrenado de espejos	40
10.	Plano de vista lateral	42
11.	Plano de vista isométrica de espejo frontal	43
12.	Plano de vista isométrica de espejo posterior	44
13.	Plano de vista isométrica de niple de 5/8" de espesor con su flange ..	45
14.	Plano de vista isométrica de tapas.....	46

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
A	Área
Af	Área de flujo
Aet	Área externa de un tubo
Ait	Área interna de un tubo
Ap	Área por pase
Bx	Brix
Q	Calor
Qe	Calor entregado
Qr	Calor requerido
DH	Cambio de entalpía
Cp	Capacidad calorífica del jugo
K	Coefficiente de transferencia de calor
Dic	Diámetro interno de la carcaza
DT	Diferencia de temperatura
US\$	Dólar estadounidense
H	Entalpía
Fj	Flujo de jugo
G	Flujo másico de jugo
mv	Flujo másico de vapor
gal	Galones
°F	Grados Fahrenheit
g	Gravedad
h	Hora

kWh	Kilowatts hora
lb	Libras
psi	Libras por pulgada cuadrada manométrica
ln	Logaritmo natural
L	Longitud
MLDT	Media logarítmica de la diferencia de temperatura
m	Metro
mm	Milímetros
Np	Número de pases
Nt	Número de tubos
Ntp	Número de tubos por pase
DP	Pérdida de carga
P	Presión
s	Segundo
T	Temperatura
Ton	Tonelada
BTU	Unidad térmica británica
v	Velocidad

GLOSARIO

Azúcar	Edulcorante que resulta de la cristalización de la sacarosa presente en el jugo de caña.
Bagazo	Subproducto fibroso que se obtiene después de la extracción del jugo a la caña.
Brix	Cantidad aparente de sólidos disueltos en una solución azucarada que son susceptibles de cristalizar.
Cachaza	Subproducto de la fabricación de azúcar, se obtiene en la etapa de clarificación de jugo, son lodos contenidos en el jugo que han sedimentado y han sido extraídos de los clarificadores por medios mecánicos.
Calandria	Haz de tubos instalados en el interior del intercambiador por donde circula el jugo.
Calentador	Equipo que se utiliza para elevar la temperatura del jugo usando vapor de agua para calentar.
Caña de azúcar	Planta utilizada para la obtención de jugo rico en sacarosa.

Centrifuga	Equipo que, mediante la fuerza centrífuga y a través de juegos de telas perforadas, separa de las masas el grano y la miel.
Chifle	Equipo, generalmente metálico, por donde se descarga o alimenta algún material.
Clarificación	Etapas del proceso de fabricación de azúcar donde se separan los lodos presentes en el jugo de la caña.
Cristalizador	Tanque provisto de agitación y a veces con enfriamiento, se utiliza para enfriar las masas y terminar de agotar las mieles.
<i>Donelly</i>	Conductor intermedio que se utiliza para alimentar la caña de molino a molino.
Evaporación	Etapas del proceso de fabricación de azúcar donde se evapora parte del agua que contiene el jugo de la caña hasta obtener un jugo más concentrado.
Floculante	Sustancia química que coagula, aglutina y precipita sólidos en suspensión.
Imbibición	Proceso que consiste en utilizar agua caliente y mezclarla con el bagazo que va al último molino para obtener una mejor extracción de sacarosa.

Jaula	Carretón que transporta la caña de azúcar del campo al ingenio y es remolcado por camiones.
Jugo alcalizado	Jugo de caña que contiene lechada de cal.
Jugo claro	Jugo de caña también llamado clarificado, libre de lodos y que se obtiene por rebalse en los clarificadores.
Lechada de cal	Solución compuesta de cal pulverizada finamente y agua a una concentración determinada.
Maceración	Proceso que consiste en utilizar el jugo del siguiente molino para mezclar con el bagazo que está saliendo del molino anterior para obtener una mejor extracción de sacarosa.
Magma	Mezcla de grano fino y jugo o agua que se usa en los tachos como semilla para preparar masas de segunda o de tercera.
Magmeros	Tanques receptores y acumuladores de magma.
Masa	También llamada templa, es el producto que se obtiene de los tachos, es una mezcla densa de granos de azúcar y miel.

Maza	Cilindro de hierro fundido, provisto de ranuras y dientes que se rotan una contra otra en los molinos, para extraer jugo de la caña.
Melador	Último evaporador del tándem de evaporación, funciona al vacío.
Meladura	Miel concentrada de 60 a 65 °Brix, que se obtiene del último vaso de evaporadores.
Melaza	Subproducto líquido, oscuro y denso resultante del agotamiento de las mieles en la fabricación de azúcar, también llamada miel final.
Miel	Líquido denso que se obtiene de la separación del azúcar en las centrífugas.
Molienda	Proceso que se lleva a cabo en la estación de molinos y consiste en prensar la caña por medio de cilindros de hierro fundido para separar el jugo del bagazo.
Tachos	Equipos de evaporación simple que funcionan al vacío, se utilizan para la cristalización y concentración de la sacarosa.
Trameros	Camiones que transportan la caña en tramos o maletas que van atadas con cadenas.

Vapor de escape	Vapor que se obtiene de las turbinas y turbogeneradores, luego de que estos han hecho su trabajo.
Vapor directo	Vapor que se obtiene de las calderas y alimenta equipos como turbinas y turbogeneradores.
Vapor vegetal	Vapor de baja presión que resulta de la ebullición del jugo en los evaporadores.
Zafra	Época de producción de azúcar en Guatemala, comprende de noviembre a abril de cada año.

RESUMEN

El Ingenio Tzululá tiene una capacidad de molienda de caña de 6 500 Ton/día, está ubicado en la región sur occidental de Guatemala y se dedica a la producción de azúcar, generación de energía eléctrica y diferentes mieles para la producción de alcohol.

El presente trabajo de graduación titulado "Diseño de un intercambiador de calor de carcaza y tubos para Ingenio Tzululá," que proporcione un beneficio económico a través del ahorro de vapor de escape, tiene como resultado final la obtención de los planos de diseño del equipo y la determinación del beneficio económico alcanzado.

Para llevar a cabo este diseño se utilizaron las ecuaciones propias de transferencia de calor, necesarias para hacer los cálculos donde intervienen conceptos como: flujo másico, brix, temperaturas de entrada y salida de jugo, temperatura y presión del vapor utilizado para el calentamiento y coeficiente de transferencia de calor, que conducen a la obtención de un área de 2 524 pies² para el calor transferido. Estos cálculos se hicieron asumiendo condiciones estables en el sistema de calentamiento, sin pérdidas de calor, con C_p y K constantes.

Para la fabricación del intercambiador de calor existe una variedad de materiales, pero se sugieren con base en la experiencia, los que comúnmente se utilizan en la industria azucarera, como láminas de acero al carbón en el cuerpo, tapas y mamparas del equipo y cobre en la tubería interna, la cual fue distribuida en un arreglo tipo triangular a 60°.

La extracción de vapor del primer efecto de la evaporación para el calentamiento del jugo claro en Ingenio Tumulá indica que se recupera la inversión en poco más de una zafra y que el beneficio económico en adelante es de Q 458 000,00, debido a la transformación en energía eléctrica del vapor de escape ahorrado y llevado a la venta a la red nacional.

Se hace, además, una breve descripción de cada uno de los pasos que intervienen en el proceso general de producción de azúcar crudo, haciendo énfasis en el calentamiento del jugo, porque es una parte importante que ayuda a obtener un jugo claro brillante, libre de partículas insolubles, lo cual redundará en un producto final de excelente calidad.

OBJETIVOS

General

Diseñar un intercambiador de calor de carcasa y tubos para ingenio Tuluá, que proporcione un beneficio económico a través del ahorro de vapor de escape.

Específicos

1. Encontrar los parámetros de diseño que permitan el escalamiento a capacidades de producción mayores.
2. Demostrar la aplicación práctica de los conocimientos sobre la transferencia de calor y su relación con el proceso de producción de azúcar.
3. Estimar el beneficio económico que podría aportar el diseño del equipo.

Hipótesis

Es posible diseñar un intercambiador de calor de carcaza y tubos para un sistema de calentamiento de un ingenio azucarero, que permita obtener un beneficio económico a través del ahorro de vapor de escape.

INTRODUCCIÓN

El proyecto denominado “Diseño de un intercambiador de calor de carcaza y tubos para Ingenio Tululá,” que proporcione un beneficio económico a través del ahorro de vapor de escape, se realizó en las instalaciones de este Ingenio, el cual está localizado en el municipio de San Andrés Villa Seca, departamento de Retalhuleu. El Ingenio está dedicado a la producción de azúcar, a la venta de energía eléctrica a través de turbogeneradores y a la producción de diferentes mieles que se obtienen a partir del jugo de caña. Estas mieles son utilizadas como materia prima para la producción de diferentes tipos de alcohol en una destilería anexa.

Como parte del proceso de producción de azúcar, es necesario calentar el jugo de caña extraído por los molinos hasta una temperatura de 220 °F para su ingreso a los clarificadores de jugo, ya que, de no ser así, el jugo tiende a mezclarse volviéndose turbio y no apto para la producción de un grano de buen color. Por esto, Ingenio Tululá, como todos los ingenios azucareros, hace uso de intercambiadores de calor de varios tipos, entre los que se encuentran los de carcaza y tubos, para elevar la temperatura del jugo hasta la requerida en el proceso. Este calentamiento se hace a través de tres o cuatro etapas en donde cada una de ellas aporta el incremento necesario hasta llevarlo a la temperatura finalmente requerida.

Sin embargo, debido principalmente al tiempo de retención en los clarificadores de jugo y al flasheo o descompresión instantánea a la atmósfera cuando ingresa el jugo a estos equipos, la temperatura desciende hasta alrededor de 202 °F, lo que ocasiona que se tenga que utilizar vapor de escape

y parte de la superficie de calentamiento del preevaporador para elevar nuevamente la temperatura de este jugo, al menos hasta su punto de ebullición.

En operación, el jugo de caña es enviado por medio de bombas centrífugas a los calentadores, en donde se hace pasar varias veces y a cierta velocidad a lo largo de una serie de tubos agrupados convenientemente, de tal manera que circule a una velocidad adecuada y tenga un tiempo de residencia suficiente que permita que el vapor, que circula alrededor de los tubos y a través de todo el largo de la carcasa, tenga tiempo suficiente para hacer su trabajo de calentamiento.

Para el diseño del calentador se utilizaron fórmulas y balances que permitieron el cálculo de un equipo importante para el proceso de producción de azúcar y que facilite elevar la temperatura del jugo clarificado por encima de su punto de ebullición a su ingreso al preevaporador, a una temperatura utilizando extracciones de vapor del primer efecto de la evaporación, lo que conduce a un ahorro de vapor de escape y a la obtención de un beneficio económico.

Las condiciones asumidas para los cálculos son las que normalmente se dan en el Ingenio y que pueden, de alguna manera, generalizarse para otros. Es decir, la utilización de vapor de agua como medio de calentamiento y de un sistema estacionario.

1. ANTECEDENTES

A través de los años, la Universidad de San Carlos de Guatemala, por medio de la Facultad de Ingeniería y la Escuela de Ingeniería Química, se ha dedicado a la investigación y el estudio de la transferencia de calor en sus diferentes formas, con el objetivo de profundizar cada vez más en las distintas maneras en que ocurre esta operación unitaria. También, para apoyar, de alguna manera, los esfuerzos que se hacen para tecnificar esta operación que está al servicio en la industria en general y así contribuir a su desarrollo.

De esa cuenta, se encuentran varios trabajos relacionados con la transferencia de calor y con el diseño de los equipos que se utilizan, como el realizado en 2006 por el Ing. José Alberto Franco Fernández titulado *Diseño de un simulador por computadora de procesos de evaporación en una línea de evaporadores de múltiple efecto*, el elaborado en 2008 por la Inga. Paula Karina Gaitán Ovalle llamado *Estudio sobre las operaciones unitarias más utilizadas en los procesos de manufactura por las industrias de procesamiento de materiales instaladas en Guatemala*, el realizado en 2010 por la Inga. Kresly Carlota Aguirre Chinchilla denominado *Diseño de un condensador barométrico tipo bandeja perforada sencilla para un sistema de evaporación* y el elaborado en 2013 por el Ing. Jorge Estuardo Chavarría Barrientos llamado *Diseño de la investigación del diseño de un calentador de agua solar utilizando asfalto como colector térmico*.

El presente trabajo pretende, como los mencionados anteriormente, contribuir con el estudio y la investigación relacionada con el diseño de un intercambiador de calor es de uso fundamental para el proceso de producción

de azúcar en la industria azucarera, proporcionando además un valor agregado de beneficio económico, al aprovechar el ahorro de vapor como fuente de energía.

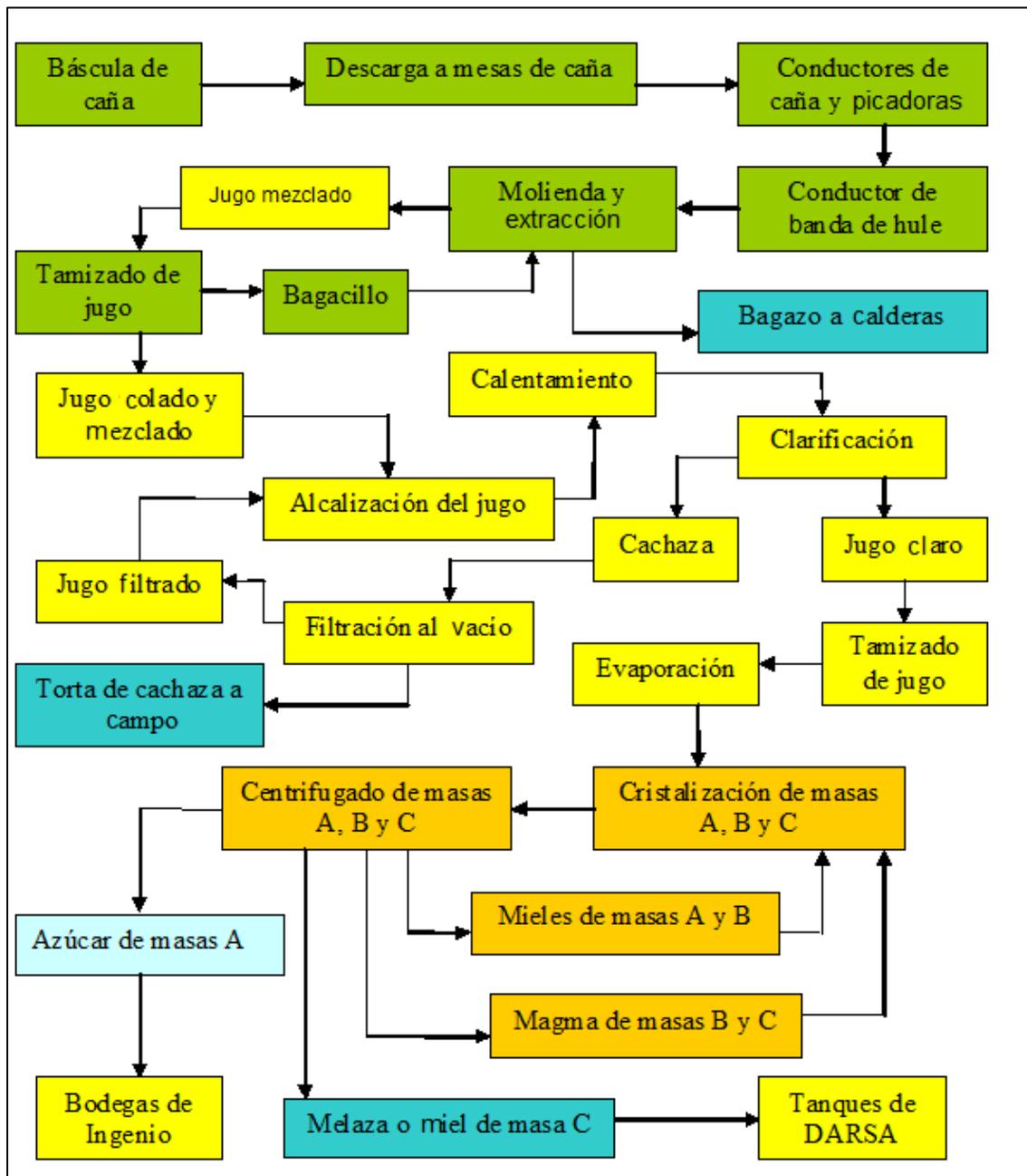
2. MARCO TEÓRICO

2.1. Generalidades del proceso de extracción y recuperación de azúcar

Durante el proceso general de fabricación de azúcar de caña se llevan a cabo una serie de procesos intermedios en el área industrial del Ingenio Tulumá, los cuales inician con la recepción y pesado de la caña cortada que llega del campo, y que finalizan con el almacenamiento del azúcar en las bodegas.

A continuación se presentan, en la figura 1, estos procesos intermedios y seguidamente se hace una descripción de cada uno de ellos.

Figura 1. Proceso general de producción de azúcar en Ingenio Tuluá



Fuente: elaboración propia.

2.2. División general del proceso

A continuación se presenta la división general del proceso en el Ingenio Tululá.

2.2.1. Descarga y preparación de la caña

La caña que llega al Ingenio viene en camiones que pasan por una báscula para determinar su peso, luego se descarga por medio de un virador hidráulico hacia unas mesas de alimentación donde es lavada para retirar la materia extraña como tierra, arena, basura, entre otros. El agua resultante del lavado de la caña es llevada por canales hacia los cañaverales para ser utilizada para riego.

La caña lavada es descargada en un conductor de tablillas metálicas, el cual la transporta hacia los molinos. En su trayecto están instaladas tres picadoras provistas de una serie de machetes oscilantes que la cortan longitudinalmente sin extraerle jugo, de esta manera se homogeniza el colchón, exponiendo las células de sacarosa. El colchón de caña es llevado al área de molienda por medio de un conductor de banda de hule, en donde está instalado un electroimán para retener partículas metálicas que pudieran venir en la caña y que eventualmente podrían dañar las mazas de los molinos.

2.2.2. Molienda

La caña preparada por las picadoras ingresa al molino 1, donde es prensada por 4 rodillos dentados de hierro fundido, iniciando el proceso de extracción de jugo y separándolo en unas bandejas recolectoras, mientras que el bagazo resultante de la primera extracción se transporta por medio de un

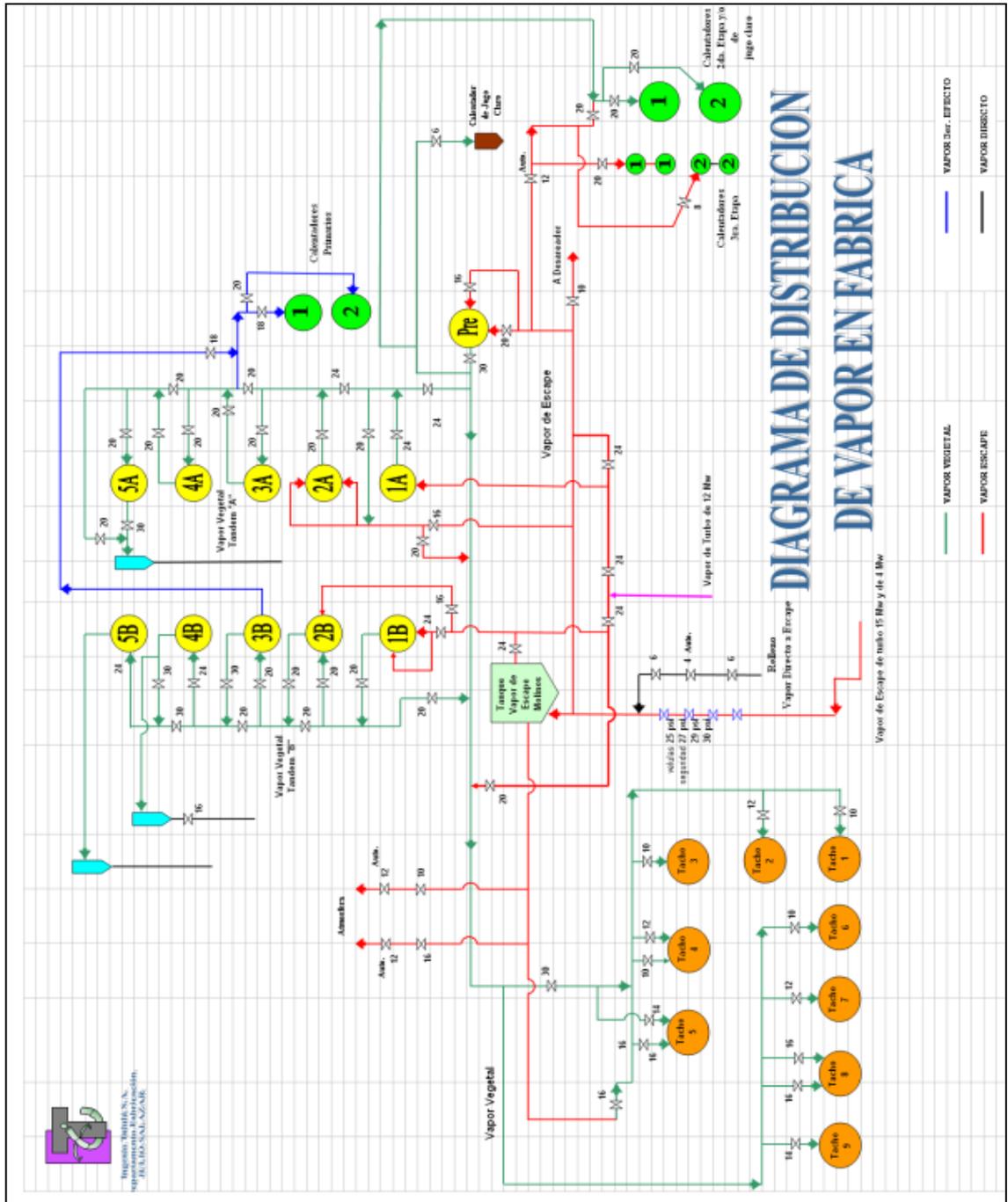
conductor de rastras tipo Donelly al molino 2. Esto ocurre de manera similar en todos los molinos, hasta llegar al molino 5 que es último del tándem. Con el objetivo de obtener una mejor extracción cuando se está produciendo azúcar, al bagazo resultante de los molinos 2 al 4 se aplica una maceración con jugo de caña de la siguiente manera: el jugo que sale del molino 5 se aplica en el bagazo que sale del 4, el del 4 se aplica al 3 y el del 3 se aplica al 2.

Sin embargo, al bagazo que va al molino 5 se le aplica agua caliente en un proceso de imbibición, para que el bagazo final al ser prensado contenga la menor cantidad posible de sacarosa. El jugo de los molinos 1 y 2 se recolecta y se envía por medio de bombas hacia un filtro rotativo, en donde se separa el bagacillo del jugo, el bagacillo retorna al conductor Donelly que lleva bagazo y jugo al molino 2 para continuar el proceso de extracción. El jugo colado va hacia un tanque pulmón y posteriormente, se transfiere con bombas hacia el tanque de alcalizado. Del molino 5 se obtiene el bagazo final de caña, el cual se envía a las calderas para ser utilizado como combustible en la generación de vapor directo que se utiliza para operar los turbogeneradores y algunos equipos de la fábrica.

2.2.3. Producción de vapor

El bagazo se suministra a las calderas por medio de un chifle, el cual está provisto de un cilindro alimentador que dosifica el bagazo según el requerimiento. La combustión del bagazo se hace en el horno de la caldera, lo cual provee de calor al domo de agua. La transferencia de calor de la combustión del bagazo hacia el agua contenida en el domo produce el vapor directo, el cual alimenta tres turbogeneradores para la generación de electricidad con conexión a la red nacional y el vapor de escape aquí generado se envía a la fábrica para el cocimiento del jugo.

Figura 2. Diagrama general de distribución de vapor en la fábrica



Fuente: Ingenio Tululá.

2.2.4. Calentamiento y clarificación

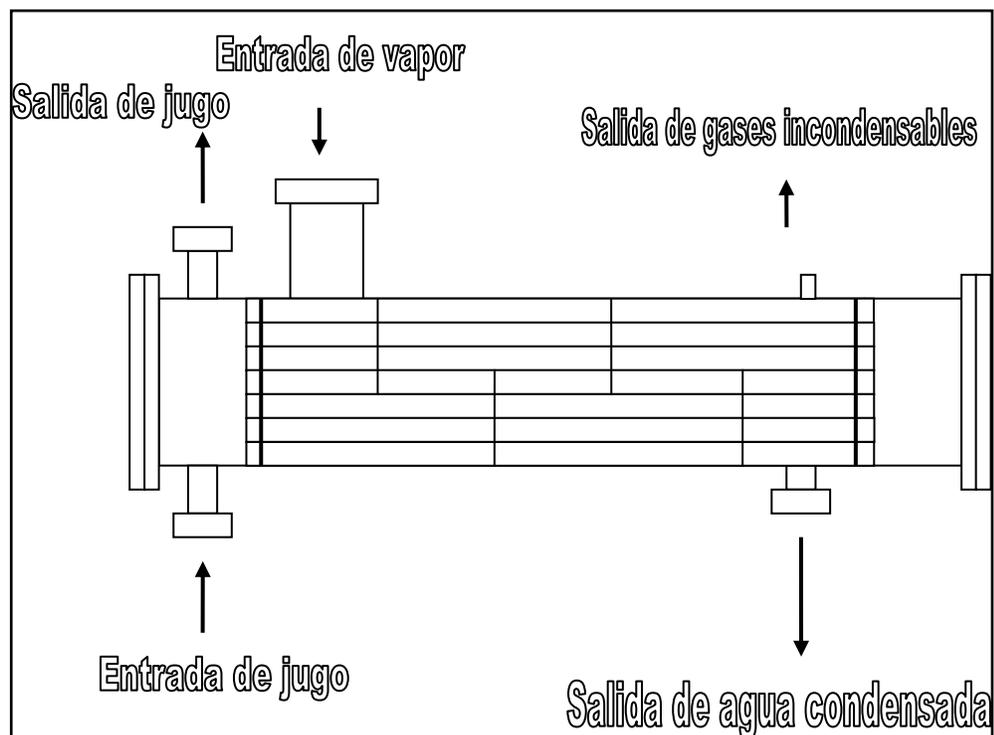
El jugo extraído tiene un pH ácido, es transportado por medio de bombas desde el tanque pulmón, que recibe el jugo colado del filtro rotativo de molinos, hacia el tanque de alcalizado, donde se aplica una solución de cal pulverizada y agua a la densidad necesaria. Con esto se neutraliza el pH del jugo y se prepara para su posterior decantación de lodos en los clarificadores. Este jugo ya alcalizado, es transferido por medio de bombas centrífugas hacia una serie de intercambiadores de calor, los cuales utilizan como medio de calentamiento vapor vegetal o vapor de escape, para elevar la temperatura final del jugo a 220 °F.

El jugo de caña calentado se introduce en 3 clarificadores o decantadores tipo Dorr Oliver 4 x 4, donde se le agrega una solución compuesta de un floculante de alto peso molecular y agua, lo cual provoca que se separen los sólidos suspendidos del jugo. El jugo claro y limpio sale por rebalse de los clarificadores y se hace pasar por tres filtros vibradores tipo tamiz hacia un tanque pulmón. El bagacillo separado en estos tamices es enviado nuevamente al tanque de alcalizado y el jugo claro en el tanque pulmón se transfiere por medio de bombas hacia los evaporadores.

Los lodos sedimentados, denominados cachaza, se depositan en el fondo de cada uno de los 4 compartimientos de los clarificadores y son extraídos por un juego de bombas especiales con ejes excéntricos, que los envían hacia un tanque denominado cachazón. En este punto se efectúa la mezcla con bagacillo de caña; dicho bagacillo se obtiene de una tela o malla colador que está montada en el conductor de bagazo hacia calderas, este bagacillo es recolectado en un pequeño depósito y se envía por un sistema de ventilador y tuberías hacia el tanque cachazón.

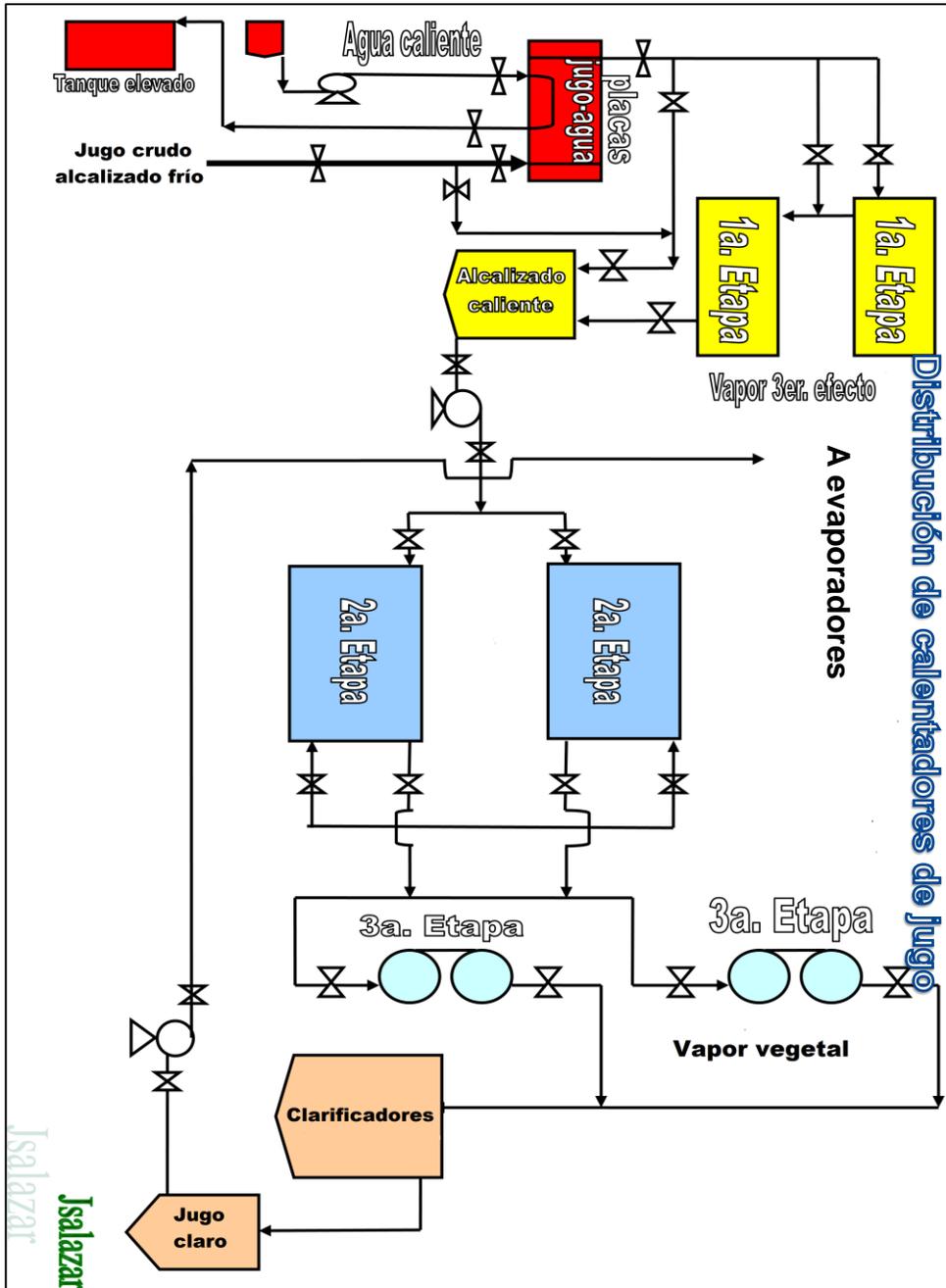
La cachaza recolectada en el cachazón se envía hacia los filtros rotativos que funcionan al vacío para extraerle el jugo remanente mediante el lavado con agua caliente de la torta de cachaza. En esta operación se obtiene jugo filtrado que se retorna al tanque de jugo alcalizado para continuar con el proceso. La torta de cachaza que resulta del proceso de filtración al vacío, es llevada por un conductor de banda de hule hacia un depósito, donde se descarga en camiones que la llevan al campo para su secado y posterior uso como fertilizante en los sembradíos de caña.

Figura 3. **Esquema general de flujo en un intercambiador de calor de carcasa y tubos en Ingenio Tululá**



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD.

Figura 4. Diagrama de flujo del jugo en el sistema de calentadores del Ingenio Tuluá



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD.

2.2.5. Evaporación

El jugo proveniente de la etapa de clarificación es introducido en un preevaporador, el cual evapora parte del agua contenida en el jugo, utilizando vapor de escape. Los condensados resultantes de la preevaporación se envían como agua de alimentación para la producción de vapor en las calderas.

Por medio de bombas centrífugas, el jugo que sale del preevaporador se transfiere hacia dos líneas de evaporadores de múltiple efecto que constan de cinco evaporadores cada una y que trabajan en paralelo. El jugo se introduce a los evaporadores número 1 de cada línea, seguidamente es transferido, por diferencia de presión, de evaporador a evaporador hasta lograr obtener, en el último evaporador, una miel denominada meladura que esté entre 60 y 65 °Brix, y que posteriormente se enviará a los tachos.

Los evaporadores número 1 de cada línea son alimentados con vapor de escape proveniente de los turbogeneradores, los evaporadores número 2 de cada línea son alimentados con el vapor proveniente de la ebullición del jugo en los evaporadores número 1, y así sucesivamente en un múltiple efecto hasta llegar al evaporador 5. El vapor producido por el evaporador 5 de cada línea es condensado al ponerlo en contacto, en condensadores barométricos, con agua fría que proviene de un sistema de enfriamiento. Posteriormente, parte de esta agua que sale de la cola de los condensadores barométricos va al sistema de enfriamiento para su reutilización y otra parte se utiliza como agua de lavado en las mesas de alimentación de caña.

El agua condensada producida en los evaporadores número 1 de ambas líneas es enviada como agua de alimentación a las calderas del Ingenio. Los condensados producidos por los evaporadores 2, 3, 4 y 5 de cada línea se

utilizan para lavar los gases que salen por la chimenea de una caldera y también para precalentar el jugo crudo de un intercambiador de calor de placas. Finalmente, esta agua que sale del intercambiador se envía a un tanque elevado para utilizarse por gravedad como agua de imbibición.

2.2.6. Cristalización

En la estación de cristalización están instalados 9 tachos de los cuales el 1 se usa para preparar grano para masas A, los 2 y 3 se usan para hacer masas B, los 4 y 5 se usan para hacer masas C, el 6 para preparar grano de masas B y los 7, 8 y 9 para hacer masas A. Todos estos equipos son evaporadores de simple efecto que funcionan al vacío.

Se utiliza el método de doble magma, es decir, preparando una cristalización con una solución de azúcar comercial con alcohol para masas C, usando magma C para hacer masas B y magma B para hacer masas A. Para preparar las masas A se utiliza meladura y semilla o magma B. La masa A es descargada en un cristizador provisto de agitación donde se termina de agotar la miel que rodea los granos de azúcar, de aquí es enviada a las centrifugas automáticas de masas A para separar el grano de la miel. Los granos separados por la centrifugación de una masa A se envían como producto terminado o azúcar comercial a la bodega para su almacenamiento y la miel denominada miel A se envía a unos tanques para ser utilizada en el proceso de elaboración de masas B.

Para preparar las masas B se utiliza miel A proveniente de los tanques y semilla o magma C. La masa B se descarga en un cristizador con agitación para terminar de agotar la miel que rodea los granos, de aquí se envía a unas

centrífugas continuas para masas B que separan el grano de la miel, el grano separado de la masa B se mezcla en un agitador mecánico con agua caliente y se obtiene magma o semilla, B la cual se envía al proceso para utilizarse como semilla para preparar masas A. La miel resultante de la centrifugación de la masa B se conoce como miel B y se envía a un tanque para utilizarla en la preparación de masas C.

Las masas C se preparan en el tacho, concentrando inicialmente meladura, miel primera o mezcla de ambas, dependiendo de las purezas de cada una, y semilla procedente de una mezcla de azúcar comercial y alcohol. Cuando la masa C ya es directa, se alimenta con miel B. La masa C se descarga en un recibidor con movimiento circular, luego para a una serie de cristalizadores provistos también de movimiento circular, con enfriamiento en los primeros y calentamiento en el último, para terminar de agotar la miel que rodea los granos de azúcar. De aquí se envía a unas centrífugas continuas para masas C en donde se separa el grano de azúcar de la miel.

El grano separado de la masa C se mezcla en un agitador mecánico con agua caliente y se produce magma C, la cual se envía al proceso para utilizarse como semilla para preparar masas B. La miel resultante de la centrifugación de la masa C se conoce como miel final o melaza y se envía a un tanque pulmón, para luego despacharla a la destilería anexa por medio de bombas de desplazamiento positivo a cisternas que la trasladan hacia los tanques de almacenamiento.

2.2.7. Envasado

El azúcar que proviene de la etapa de centrifugación, en las centrífugas automáticas de masas A, es trasladado por medio de un conductor helicoidal a

un elevador de cangilones y posteriormente a una serie de transportadores de banda. Estos la descargan en una báscula para determinar el peso de cada *batch* y finalmente pasa a la bodega de azúcar a granel. El peso de cada *batch* es registrado automáticamente por un sistema de computación y el operador de la báscula reporta la producción al final de cada turno.

2.3. Fundamentos teóricos

A continuación se presentan los antecedentes de este proyecto de investigación.

2.3.1. Temperatura

Es una propiedad física de cualquier sistema. Cuando en dos sistemas no hay diferencia de temperatura se dice que están en equilibrio térmico y no habrá transferencia de calor entre ellos. Sin embargo, cuando existe una diferencia de temperatura, el calor tiende a transferirse del sistema que tenga mayor temperatura, al de menor temperatura hasta alcanzar el equilibrio térmico.

2.3.2. Presión

La presión de un fluido sobre una superficie está definida como la fuerza que ejerce el fluido por unidad de área de la superficie. Las unidades de medida son varias, pero generalmente están dadas en libras por pulgada cuadrada (psi), Newton por metro cuadrado o pascales.

2.3.3. Calor

Es una medida de la energía que se transfiere o se requiere en un sistema cuando hay una diferencia de temperatura.

2.3.4. Energía

Es la capacidad que tiene un sistema para realizar un trabajo determinado.

2.3.5. Determinación de fórmulas

Para procesos como el de este estudio que involucra jugo de caña, el cual se define como una solución azucarada, se hace uso de las siguientes ecuaciones:

2.3.6. Capacidad calorífica de soluciones azucaradas (Cp)

Es la energía necesaria para aumentar la temperatura de una sustancia en una unidad de temperatura. Por facilidad, se utiliza la ecuación de uso muy generalizado en la industria azucarera definida por Hugot¹ mediante la siguiente relación:

$$C_p = 1 - 0,006 \cdot B_x \quad [\text{Ec. 1}]$$

Donde

Bx: Brix del jugo que es la cantidad de sólidos solubles que contiene

Cp: capacidad calorífica del jugo a esa concentración, en Unidad Térmica Británica por libras por grados Fahrenheit

¹ HUGOT, E. *Manual del ingeniero azucarero*. p. 449.

2.3.7. Balance de energía para calentamiento del jugo

Se procede con el balance de energía para el calentamiento del jugo clarificado en el proceso de intercambio de calor por vapor condensado. Se asume que las pérdidas de calor son despreciables, que la capacidad calorífica (C_p) y el coeficiente de transferencia de calor (K) son constantes y que el vapor condensado no se enfría considerablemente de tal manera que la energía recibida será igual a la energía entregada al sistema. Entonces, para determinar la energía recibida o calor requerido para el calentamiento del jugo, se utiliza la siguiente ecuación:

$$Q_r = F_j \cdot C_p \cdot DT \quad [\text{Ec. 2}]$$

Donde

F_j : flujo de jugo entrando al calentador, en libras por hora

C_p : capacidad calorífica del jugo de caña, en Unidad Térmica Británica por libras por grados Fahrenheit

DT : diferencia de temperatura salida - entrada del jugo en el calentador, en grados Fahrenheit

Q_r : calor requerido por el sistema en Unidad Térmica Británica por hora

2.3.8. Entalpía (H)

Es el flujo de energía que se transfiere en un sistema. Si esta transferencia de calor se da a presión constante, se dice que el calor (Q) transferido es igual a la diferencia de entalpía. El requerimiento de calor se obtiene con vapor saturado y se asume que este vapor solo cambia de fase sin cambiar de temperatura, entonces la energía transferida es únicamente el calor latente de vaporización. Este calor es la diferencia de entalpías del líquido y del

vapor, a una temperatura dada. La energía entregada por el vapor estará definida por la energía entregada, que es igual al calor transferido y de acuerdo a la siguiente ecuación se tiene:

$$Q_e = m_v \cdot D_H \quad [\text{Ec. 3}]$$

Donde

Q_e : calor entregado al sistema, en Unidad Térmica Británica por hora

m_v : flujo másico de vapor, en libra por hora

D_H : entalpía del cambio de fase de vapor a líquido, en Unidad Térmica Británica por libra

Con esta ecuación se determina el flujo de vapor necesario para realizar el intercambio de calor. Para esto se necesita saber la presión, en bares, a la que va a trabajar el intercambiador y luego se busca en las tablas de vapor respectivas, para así encontrar el cambio de entalpía.

Algunos autores recomiendan multiplicar este valor encontrado por 1,03 a 1,05 para compensar las pérdidas de energía térmica. Sin embargo en este trabajo, estas pérdidas, como ya se especificó antes, se van a despreciar.

2.3.9. Coeficiente global de transferencia de calor (K)

Es el valor recíproco de la resistencia total al flujo de calor. En este proceso hay varias resistencias a ese flujo, tanto del lado del vapor como del lado del jugo, entre las que están, la resistencia propia de la película de jugo, la resistencia que se forma por el vapor condensado y la resistencia presentada por el material del tubo. Todas estas resistencias se consideran, en este trabajo, despreciables, debido a que tienen muy poca incidencia en el

comportamiento del coeficiente de transferencia de calor, siempre que se mantenga una velocidad aceptable del jugo, la cual debe estar idealmente entre 5 y 7 pies/s².

La resistencia ocasionada por las incrustaciones, que son depósitos de material que se van acumulando en el interior de los tubos de transferencia y que pueden ser causados por la composición del tubo o la velocidad del jugo en el interior de los tubos, sí es tomada en cuenta, ya que al irse acumulando con la operación del equipo, se va reduciendo la capacidad de transferencia de calor, pudiendo causar que el calentador tenga que dejar de operar para hacerle una exhaustiva limpieza, con la consiguiente pérdida de tiempo. Se debe tomar en cuenta que se está trabajando con jugo clarificado al que se le ha removido gran cantidad de materia insoluble y partículas que pueden incrustarse en el interior de los tubos, por lo que se considera que es un fluido bastante limpio, si se compara por ejemplo con un jugo crudo o alcalizado.

Se han diseñado muchas fórmulas por parte de investigadores, sin embargo, la más utilizada en la industria azucarera y que toma en cuenta la temperatura y velocidad del jugo es:

$$K=(T-32)/((0,9+(2,2/v))) \quad [\text{Ec. 4}]$$

Donde

K: coeficiente global de transferencia de calor, en Unidad Térmica Británica por pie cuadrado por hora por grados Fahrenheit

T: temperatura del vapor, en grados Fahrenheit

v: velocidad del jugo, en pie por segundo

² CHEN, James. *Manual de la caña de azúcar*. p. 227.

2.3.10. Área de transferencia

Generalmente todos los ingenios cuentan con varios calentadores porque el calentamiento del jugo se hace por etapas, es decir, que en cada uno se va incrementando la temperatura para llegar a la temperatura final deseada. De esta manera, cuando hay necesidad de sacar de operación alguno de estos equipos por cualquier causa, se tiene la capacidad de calentar el jugo a la temperatura que requiere el proceso sin problemas. Es de uso muy generalizado calcular el área de transferencia tomando en consideración el diámetro externo de los tubos y la distancia entre las placas, por lo que aquí se hace de esa manera, mediante la ecuación general siguiente:

$$Q_r = A * K * MLDT$$

Despejando A queda: $A = Q_r / (K * MLDT)$ [Ec. 5]

Donde

Q_r: calor requerido, en Unidad Térmica Británica por hora

A: área total de transferencia, en pie cuadrado

K: coeficiente de transferencia de calor, en en Unidad Térmica Británica por pie cuadrado por hora por grados Fahrenheit

MLDT: media logarítmica de la diferencia de temperatura, en grados Fahrenheit

2.3.11. Número de tubos (N_t)

En el mercado existe una variedad de diámetros y materiales para los tubos utilizados en los calentadores. Sin embargo, debido a que el cobre ha demostrado, a través de los años de su uso en la industria, su resistencia a la corrosión y buena transferencia de calor, además de una tendencia a

estandarizar materiales y diámetros en los evaporadores, para el presente diseño se utilizan tubos de cobre 16 BWG de 1 3/4" de diámetro externo por 20 pies de largo. Para conocer la cantidad de tubos que se necesitan se utiliza la siguiente fórmula.

$$N_t = A / A_{et} \quad [\text{Ec. 6}]$$

Donde

N_t : número de tubos

A : área total del transferencia, en pies cuadrados

A_{et} : área externa de un tubo, en pies cuadrados

Se sabe que el área externa de un tubo es

$$A_{et} = \pi * D_e * L \quad [\text{Ec. 7}]$$

Donde

D_e : diámetro externo de los tubos, en pies

L : longitud de los tubos, en pies

2.3.12. Área de flujo

Este dato servirá para saber el número total tubos en cada pase del calentador. Se calcula inicialmente el flujo másico total que ingresa al calentador a la velocidad requerida y la densidad del jugo, luego se calcula el área necesaria para ese flujo mediante la siguiente ecuación:

$$A_f = G / v \quad [\text{Ec. 8}]$$

Donde

Af: área de flujo, en pies cuadrados

G: flujo másico de jugo, en pies al cubo por segundo

v: velocidad del jugo, en pies cuadrados por segundo

Con esta área por pase calculada, solo se tiene que dividir entre el área interna de un tubo, la cual se calcula multiplicando $\frac{1}{4}$ pi por el diámetro interno al cuadrado de un tubo, y así se obtiene el número de tubos por pase (Ntp) necesarios en el intercambiador de calor, de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$Ntp = Af / Ait \quad [Ec. 9]$$

Donde

Ntp: número de tubos por pase

Af: área de flujo, en pies al cuadrado

Ait: área interna de un tubo, en pies al cuadrado

Lo siguiente será dividir el número total de tubos, calculados con la ecuación 6, entre el número de tubos por pase, calculados con la ecuación 8, y se obtienen los pases necesarios en el intercambiador de calor.

2.3.13. Caída de presión

La caída de presión en los intercambiadores de calor, toma en cuenta una serie de variables relacionadas con el material del que está fabricado el equipo, los materiales que van a circular en los tubos y la carcaza, así como las incrustaciones dentro de los tubos.

Para hacer más simples estas operaciones, únicamente se tomará en cuenta la caída de presión del lado de los tubos. Para esto se hace uso de ecuaciones que ya han sido determinadas por investigadores como Hugot y Baloh, de tal manera que si utiliza precisamente la ecuación de Baloh,³ y se tiene:

$$DP = ((Np*(v^2)*(1,565+0,025*L/Di)))/(2*g) \quad [Ec. 10]$$

Donde

DP: pérdida de carga, en metro

Np: número de pases en el calentador

v: velocidad, en metros por segundo

L: longitud de los tubos, en milímetros

Di: diámetro interno de los tubos, en milímetros

g: aceleración de la gravedad (9,81 m/s²)

³ BALOH, Tone; WITTMER, Enrique. *Manual de energía para fábricas de azúcar*. p. 86.

3. DISEÑO METODOLÓGICO

3.1. Variables

Las variables se dividen en variables de diseño y variables de proceso.

3.1.1. Variables de diseño

A continuación se presentan las variables de diseño.

- Temperatura de salida del jugo
- Número de tubos
- Diámetro interno de la carcaza
- Número de pases
- Costo estimado

3.1.2. Variables de proceso

A continuación se presentan las variables de proceso.

- Temperatura de entrada del jugo
- Flujo de jugo
- Temperatura del vapor

3.2. Delimitación de campo de estudio

Esto significa ponerle un límite a la investigación, sirve de guía y contención para aclarar y poner medida a las expectativas del proyecto.

- Área de industria: azucarera
- Proceso industrial: producción de azúcar
- Etapa del proceso: evaporación
- Equipo: intercambiador de calor
- Alternativa: intercambiador de calor de carcaza y tubos

3.3. Recursos humanos disponibles

Los recursos humanos disponibles para esta investigación se presentan a continuación.

- Investigador: Julio Cesar Salazar de León
- Asesor: Ing. Qco. Miguel Lemus
- Revisor: Ing. Qco. Jorge Godínez
- Fuente: personal del área de fabricación del Ingenio Tululá

3.4. Recursos materiales disponibles

Se presenta un listado de los recursos materiales utilizados en esta investigación.

- Sistema de calentamiento y evaporación del Ingenio Tululá
- Literatura relacionada disponible
- Programa de AutoCAD 2009

- Excel 2007
- Word 2007

3.5. Técnica de recolección y ordenamiento de la información

Se investigó de manera descriptiva la información existente en la literatura relacionada a la utilización de un intercambiador de calor en la industria azucarera. Se consultaron gráficas, tablas y relaciones propias de esta industria y se hizo un estudio correlacional entre esta información y los resultados encontrados, como el comportamiento entre la velocidad del jugo y el coeficiente de transferencia de calor o las pérdidas de transferencia por efecto de la incrustación en el interior de los tubos.

Toda la información recolectada se utiliza en la definición de una serie de datos y tablas, para determinar las ecuaciones en la realización de los cálculos que permiten la determinación del área final de transferencia de calor necesaria para la cantidad de jugo que circula por el intercambiador de calor. También dichos cálculos brindan la información para determinar el ahorro obtenido con la implementación del proyecto, y finalmente, permiten obtener los planos finales del equipo diseñado.

4. RESULTADOS

4.1. Cálculo de la capacidad calorífica del jugo clarificado

De acuerdo a resultados obtenidos en zafras anteriores en el Ingenio Tumulá, se sabe que el jugo clarificado muestra un promedio de 15 °Brix por lo se utiliza este dato para sustituirlo en la ecuación 1 y así obtener la capacidad calorífica de este jugo:

$$C_p = 1 - 0,006 * 15 = 0,91 \text{ BTU/lb}^\circ\text{F}$$

4.2. Cálculo del calor requerido en el sistema

De acuerdo al anexo 1, donde se muestran los cálculos hechos para el balance de materiales, se tiene que al calentador ingresa un promedio de 552 555 Lbs/h de jugo clarificado. Por lo tanto, al sustituir este valor, la C_p obtenida anteriormente, así como las temperaturas de entrada y salida que se requieren como mínimo en el calentador en la ecuación 2, se obtiene la cantidad de calor que se transfiere en el sistema:

$$Q_r = (552\ 555 \text{ Lb/h}) * (0,91 \text{ BTU/Lb}^\circ\text{F}) * (222^\circ\text{F} - 202^\circ\text{F}) = 10\ 056\ 501 \text{ BTU/h}$$

4.3. Cálculo de la cantidad de vapor necesaria en el sistema

La cantidad de calor requerido es igual a la cantidad de calor transferido, por lo tanto, al sustituir y despejar el dato del calor encontrado anteriormente y

el valor de la entalpía que indican las tablas de vapor en la ecuación 3 se obtiene la cantidad de vapor que se necesita para la transferencia:

$$mv = ((10\ 056\ 501\ \text{BTU/h}) / DH)$$

Para el caso del Ingenio Tululá, el vapor vegetal que produce el primer efecto de la evaporación tiene, en promedio, una presión de 6 psi, que equivalen a 20,696 psia y estos a su vez equivalen a 1,43 bares. Por lo tanto, al consultar las respectivas tablas de vapor saturado a esta presión en el anexo 3 se obtienen 2 230 kJ/kg de calor latente, que es igual a 959 BTU/lb. Este dato se sustituye en la ecuación anterior, para obtener la cantidad de vapor requerida:

$$mv = ((10\ 056\ 501\ \text{BTU/h}) / (959\ \text{BTU/Lb})) = 10\ 486,45\ \text{Lb/h}$$

4.4. Cálculo del coeficiente de transmisión de calor

El cálculo del coeficiente de transferencia de calor se obtiene de la ecuación 4. En el Ingenio Tululá la temperatura promedio del vapor vegetal extraído del primer efecto de la evaporación es de 237 °F y la velocidad del jugo en el calentador se asume entre 5 y 7 pies/s, que debiera ser la ideal, puesto que a mayores velocidades, aunque se incrementa el coeficiente de transmisión de calor, hay mayor pérdida de carga y por el otro lado, a velocidades menores se ocasionan mayores incrustaciones en la parte interna de los tubos que transportan el jugo, disminuyendo la capacidad de transferencia de calor. En este estudio, y para efectos del diseño, se toma la velocidad de 7 pies/s para calcular el coeficiente de transmisión de calor.

$$K = ((237\ ^\circ\text{F} - 32)) / ((0,9 + ((2,2/7\ \text{pies/s}))) = 168,82\ \text{BTU}/\text{pie}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{F}$$

4.5. Cálculo del área de transferencia

Para calcular el área de transferencia se utiliza la ecuación 5, pero para esto se debe saber la media logarítmica de la diferencia de temperatura en el sistema. La temperatura del vapor usado en el calentamiento corresponde, como se mencionó anteriormente, a 237 °F y la temperatura de entrada y salida mínima requerida para el sistema es de 202 y 222 °F respectivamente. Con estos datos se procede a calcular la media logarítmica de la diferencia de temperatura de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$MLTD = \frac{(T_{\text{vapor}} - T_{\text{entrada jugo}}) - (T_{\text{vapor}} - T_{\text{salida jugo}})}{\ln \left(\frac{(T_{\text{vapor}} - T_{\text{entrada jugo}})}{(T_{\text{vapor}} - T_{\text{salida jugo}})} \right)} \quad [\text{Ec. 11}]$$

Sustituyendo datos se tiene:

$$MLTD = \frac{(237 \text{ °F} - 202 \text{ °F}) - (237 \text{ °F} - 222 \text{ °F})}{\ln \left(\frac{(237 \text{ °F} - 202 \text{ °F})}{(237 \text{ °F} - 222 \text{ °F})} \right)} = 23.60 \text{ °F}$$

Con este valor y los otros ya calculados en ecuaciones anteriores se utiliza la ecuación 5 para calcular el área de transferencia que se necesita:

$$A = Q / (K * MLTD)$$

Sustituyendo datos se tiene:

$$A = (10\,056\,501 \text{ BTU/h}) / ((168,82 \text{ BTU/p}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{°F}) * (23,60 \text{ °F})) = 2\,524 \text{ p}^2$$

4.6. Cálculo del número de tubos

Se utilizarán tubos de cobre de diámetro externo 1 3/4" BWG 16 y 20 pies de largo. Se procede de acuerdo a la ecuación 6 que requiere el área de transferencia de calor externa de un tubo, cuya fórmula es:

$$A_{et} = \pi [D_e \cdot L]^2$$

Sustituyendo datos se tiene:

$$A_{et} = 3,1416 \cdot 0,14583 \text{ pies} \cdot 20 \text{ pies} = [9,16 \text{ pies}]^2$$

Lo que al sustituir en la ecuación 6 da:

$$N_t = A/A_{et} = 2524 \text{ pie}^2 / 9,16 \text{ pie}^2 = 276 \text{ tubos}$$

Para calcular el área de flujo se utiliza la ecuación 7 que requiere el flujo másico del jugo (G) en pies por segundo y como la densidad del jugo de acuerdo al anexo 3 es de 8,852 lb/gal, entonces se obtienen:

$$552555 \text{ lb/h} \cdot 1 \text{ h} / 3600 \text{ s} \cdot 1 \text{ gal} / 8,852 \text{ lb} \cdot 1 \text{ pie}^3 / 7,48 \text{ gal} = 2,32 \text{ p}^3/\text{s}$$

Sustituyendo este dato en la ecuación 7 y la velocidad del jugo, que ya se tenía, se calcula el área por pase necesaria para ese flujo y a esa velocidad:

$$A_f = G/v = (2,32 \text{ pie}^3/\text{s}) / (7 \text{ pie}/\text{s}) = 0,33 \text{ pie}^2$$

El área de flujo interna de un tubo de 1 3/4" BWG 16 diámetro externo, sabiendo del anexo 4 que tiene un espesor de pared de 0,065 pulgadas, es de

0,0143139 pies², lo cual sale de multiplicar $\frac{1}{4}$ de pi por el diámetro interno al cuadrado. Para hallar el número de tubos por pase que se necesitan para este flujo se hace uso de la ecuación 8:

$$N_{tp} = (0,33 \text{ pie}^2) / (0,0143139 \text{ pie}^2) = 23 \text{ tubos / pase}$$

Luego de calcular la cantidad de tubos que deben ir en cada pase del calentador, se divide el número total de tubos que necesita el calentador entre la cantidad de tubos por pase y se obtiene el número de pases que debe tener el calentador.

$$N_p = 276 \text{ tubos} / 23 \text{ tubos/pase} = 12 \text{ pases}$$

Los cálculos anteriores indican que el intercambiador debe ser diseñado con un total de 276 tubos de cobre 16 BWG de 1 $\frac{3}{4}$ " de diámetro externo por 20 pies de largo, distribuidos en 12 pases de 23 tubos cada uno.

4.7. Caída de presión

Se debe calcular la caída de presión que hay en el intercambiador debido a la configuración calculada y la circulación del jugo en los tubos, para esto se utiliza la ecuación 9:

$$DP = (N_p * v^2) * (1,565 + 0,025 * L/D_i) / (2 * g)$$

Sustituyendo datos se tiene:

$$DP = (12 * (2,13)^2) * (1,565 + 0,025 * 6096/41,148) / (2 * 9,8) = 14,63 \text{ m}$$

4.8. Arreglo de tubos

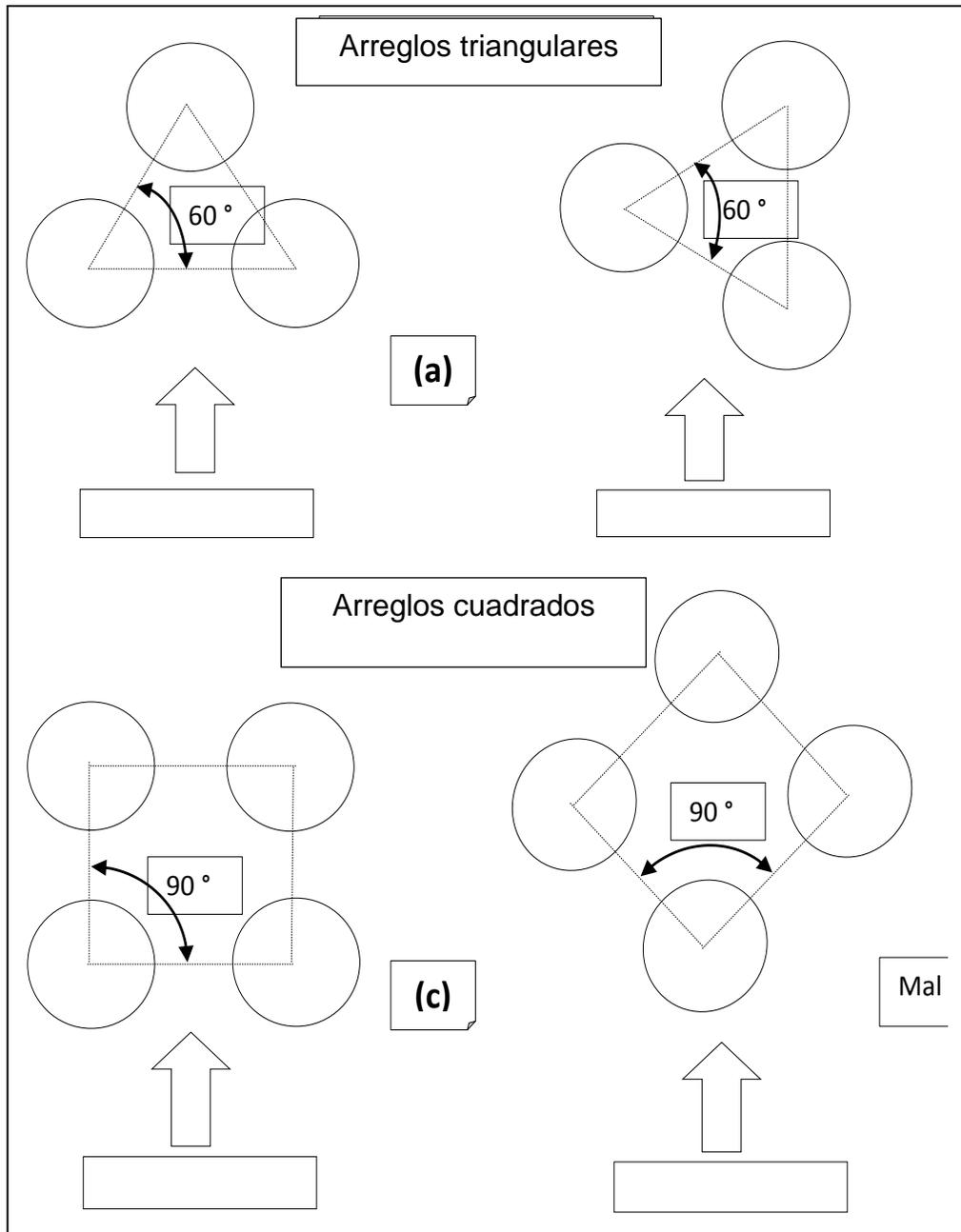
La disposición general de los tubos determina la cantidad que puede contener la carcasa de un diámetro interior determinado. Esta cantidad de tubos va distribuida de acuerdo a la cantidad de pases del intercambiador de calor y será la que defina el área total del mismo. Hay algunas maneras de distribuir los tubos en un intercambiador, desde arreglos cuadrados y triangulares a 60°, 45° o 90°, habiendo ventajas y desventajas en cada uno de ellos. Para este trabajo se define un arreglo triangular a 60°, tomando en consideración que es un arreglo que permite albergar una mayor cantidad de tubos en el interior de la carcasa, contribuyendo a que el diámetro interno de esta sea menor. El criterio que se utiliza en cuanto a la separación de centro a centro entre ellos es:

$$1,25 < (Pt/De) < 1,5$$

Donde Pt es la distancia de centro a centro de los tubos y De es el diámetro externo de los tubos. Generalmente se escoge un espaciado mínimo entre tubos porque esto también resultaría en un menor diámetro de la carcasa. Sin embargo, estos tubos no deben estar demasiado cerca entre sí, porque dificultan la instalación o la remoción de los mismos, ya que van expandidos a los espejos y principalmente, porque la placa de tubos se puede debilitar desde el punto de vista de su estructura.

Es muy utilizado el criterio mínimo de 1,25 * diámetro externo del tubo, porque además de respetar la estructura de las placas, es una medida que permite contener la mayor cantidad de tubos posible.

Figura 5. **Diferentes arreglos de tubería en un intercambiador de calor de carcaza y tubos**



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD.

4.9. Diámetro interno de la carcaza

Como el arreglo de los tubos internos es triangular a 60°, se sigue el procedimiento rápido y empírico descrito en *Soluciones prácticas para el ingeniero* de Carl Branan. Para lo que se dibujan tres tubos con distancia de centro a centro de 1,25 por el diámetro externo del tubo, formando un triángulo equilátero cuyo lado es igual a la distancia centro a centro calculada. Seguidamente se busca el área de ese triángulo de acuerdo a la fórmula

$$A = \frac{1}{2}(b * h) \quad [\text{Ec. 13}]$$

Donde

B: base del triángulo

h: altura del triángulo

Como se conoce b, se procede a calcular h por medio del Teorema de Pitágoras y se obtiene $h = 1,8944$ ". Ya conocidos b y h se sustituyen en la fórmula anterior:

$$A = \frac{1}{2}(2,1875 * 1,8944) = 2,075 \text{ pul}^2$$

Esta área calculada solo contiene medio tubo, por lo que hay que calcularla para la totalidad de tubos del intercambiador, que son 276, y para esto se requiere una área de $2 * 2,075 * 276 = 1\,145,40 \text{ pulg}^2$.

Con esto se puede calcular el diámetro interno de acuerdo a la fórmula:

$$A = \frac{1}{4} * \text{Pi} * (Dic)^2 =$$

Se despeja D_{ic} , que es el diámetro interno de la carcaza en pulgadas, y se sustituye el área que ya se conoce:

$$D_{ic} = \sqrt{(4 * A)/\pi}$$

Sustituyendo datos en la fórmula anterior se tiene finalmente:

$$D_{ic} = \sqrt{(4 * 1\,145,40)/\pi} = 38,19 \text{ pulg}$$

Para dejar un espacio adecuado de seguridad en la periferia de los espejos, se agrega al menos un diámetro de tubo alrededor de este, lo que significa sumar al menos dos diámetros de tubo al diámetro calculado. Por lo tanto, el diámetro aumenta a:

$$D_c = 38,19 \text{ pulg} + (2 * 1,75 \text{ pulg}) = 41,69 \text{ pulg}$$

A este dato se le suma el espacio ocupado por el espesor de las mamparas que van soldadas a los espejos y los espacios que separa cada pase, que son los que le darán dirección de ida y retorno al flujo de jugo. Según el diseño hay tres espacios de $2 \frac{3}{4}$ " cada uno, por lo que se tienen que sumar $8 \frac{1}{4}$ " más, entonces, el diámetro interno final de la carcaza es $41,69" + 8,25" = 49,94"$ que se aproxima a $50"$.

Al hacer la distribución real de la tubería, conociendo los espacios y espesores de lámina en las placas denominadas espejos y utilizando el programa de diseño AutoCAD, se determina que se necesita un diámetro final de $53,5"$, dato que está muy cercano al calculado con el procedimiento anterior. Se determina dejar el diámetro interno de la carcaza en $53,5"$, con el objetivo de trabajar con mayor holgura para el uso de los *expander*.

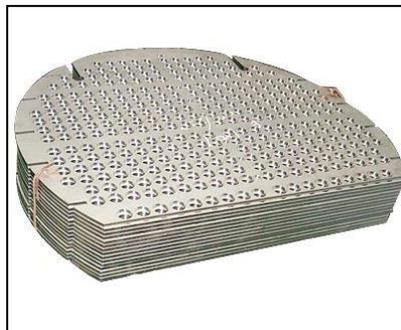
4.10. Baffles

El espaciado de los baffles que van en el interior sosteniendo los tubos y que sirven también para direccionar el flujo de vapor que va alrededor de estos, se calcula tomando en cuenta el siguiente criterio:

$$0,4 < Dic < 0,6$$

Donde Dic es el diámetro interno de la carcaza con corte de los baffles del 15 al 35 % del Dic, siendo el 25 % el corte más usual, y para la separación entre ellos se utilizará la máxima posible de acuerdo al criterio arriba indicado.

Figura 6. **Ejemplo de colocación de baffles para el barrenado**

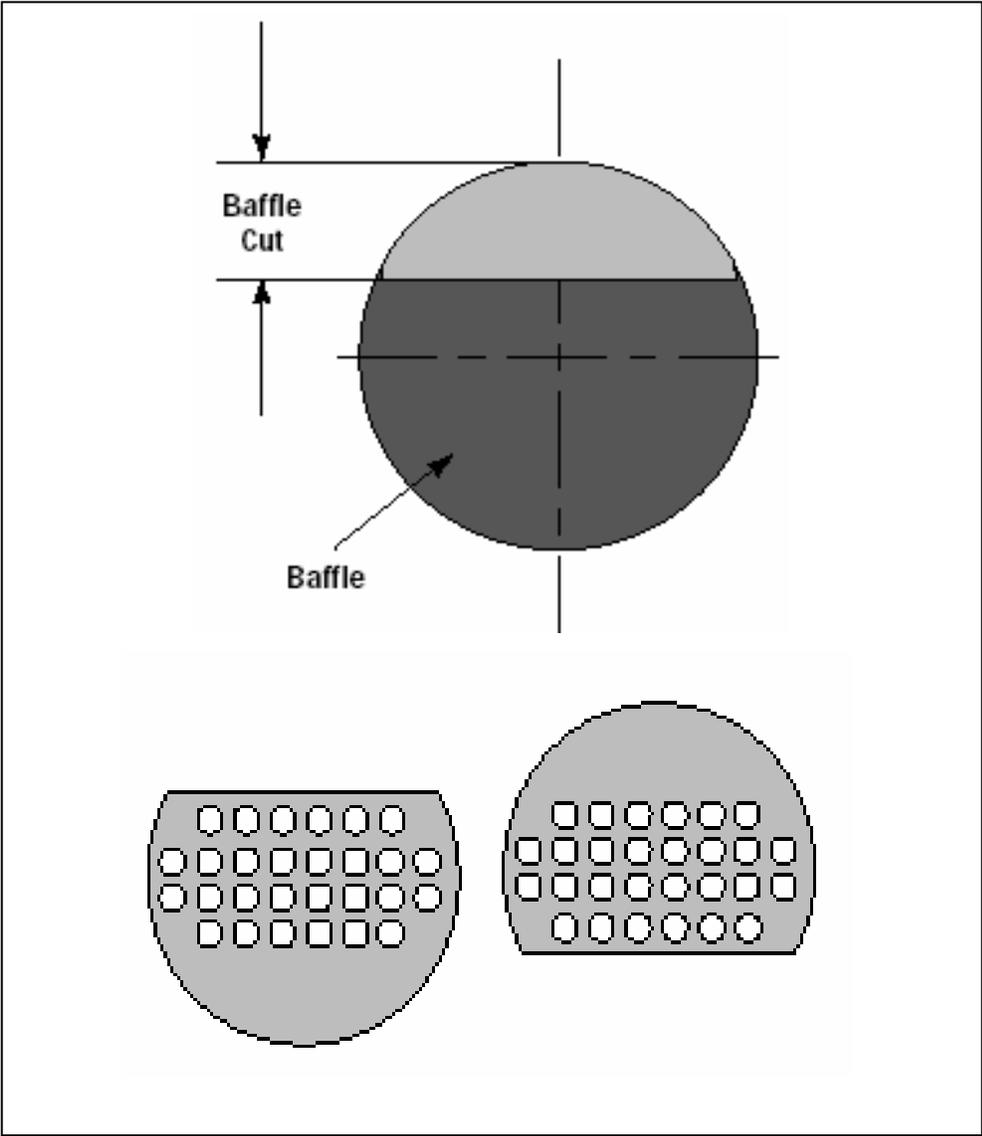


Fuente: *Baffles para el barrenado*. <https://www.google.com.gt/search?q=baffles+para+el+barrenado&espv=2&biw=1517&bih>. Consulta: agosto de 2015.

Los baffles o deflectores segmentados son los más comunes, consisten en láminas de metal perforadas por donde pasan algunos tubos y cuya altura es generalmente el 75 % del diámetro interno de la carcaza, pueden ser simples, dobles o triples. En este proyecto se utilizarán baffles simples y se barrenarán

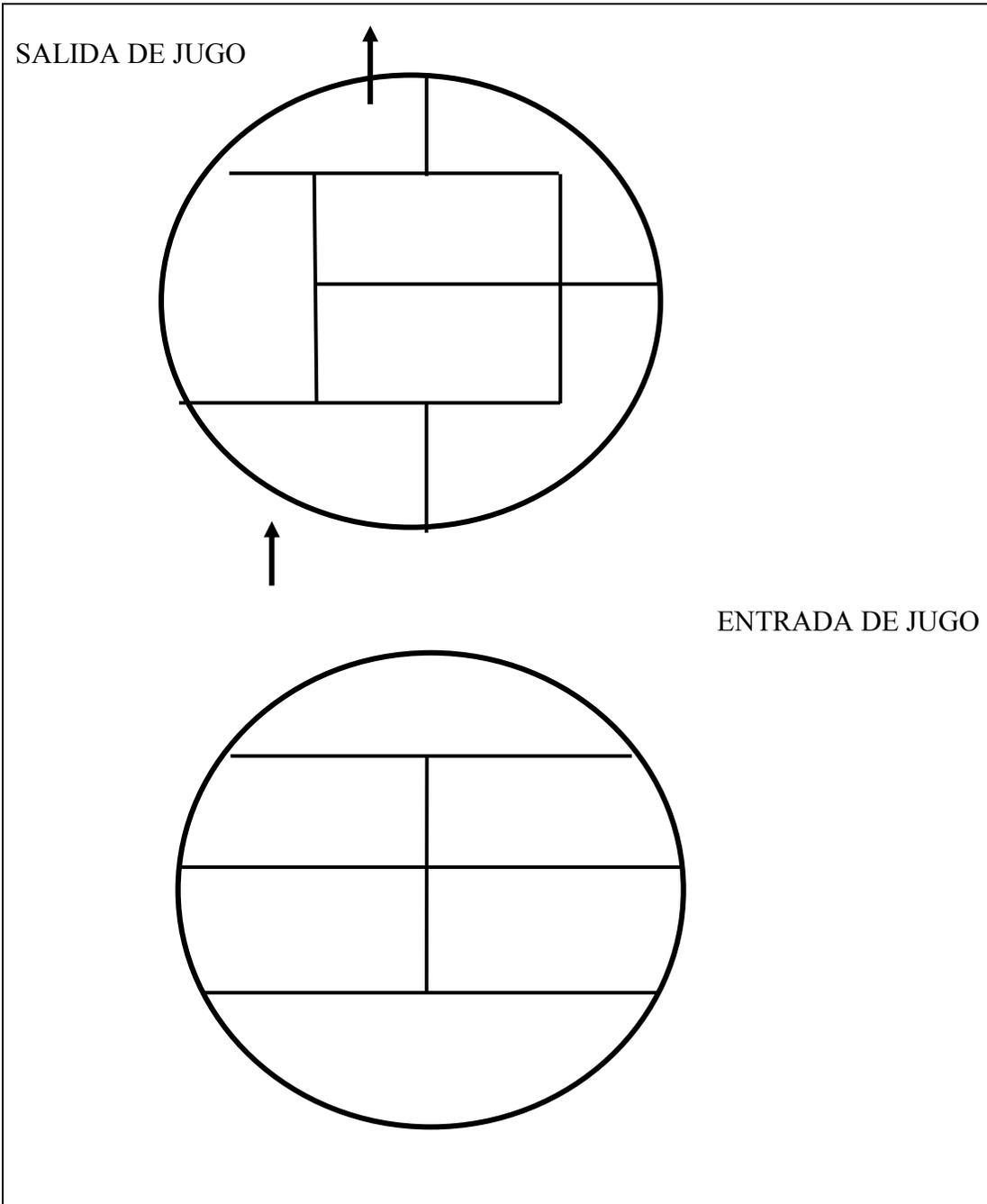
todos a la vez para asegurar que los agujeros coincidan totalmente tanto entre sí como con los espejos.

Figura 7. **Baffles segmentados y su respectivo corte**



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD.

Figura 8. **Espejos frontales anterior y posterior de 12 pases del intercambiador de calor**



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD.

4.11. Plantilla de barrenado

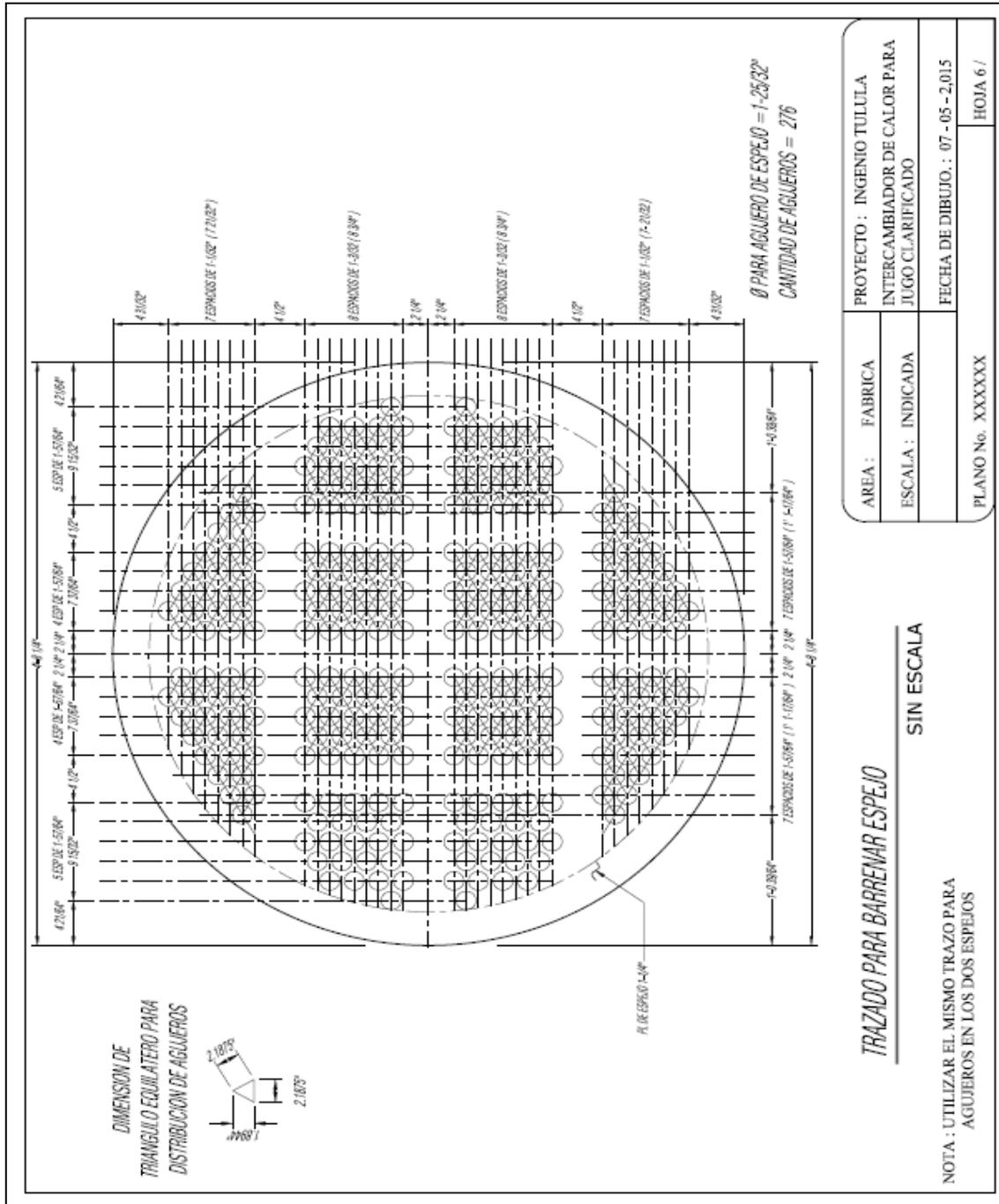
Esta plantilla no es más que un dibujo de la distribución final de los tubos en el interior del intercambiador, identificando la posición de cada uno de los tubos de transferencia para el barrenado de los agujeros de los espejos y que esto sirva de base para la perforación de los agujeros de los baffles. Para el trazado de la plantilla se deberán aportar los siguientes datos:

- Número total de tubos de transferencia
- Diámetro exterior de los tubos
- Número de pases
- Espacio entre pases
- Arreglo de la tubería

Con estos datos, además del círculo límite de tubos, que es el diámetro límite para agregar tubos y al menos los dos diámetros externos del tubo, se procede al trazo de esta forma:

- Trazar un sistema de ejes cartesianos x, y .
- Trazar el círculo límite de tubos con centro en la intersección de los ejes (x, y) del inciso anterior.
- Trazar familias de rectas conforme al arreglo de tubos hasta llenar el área comprendida por el círculo límite de tubos.
- Dibujar el contorno de los tubos más $1/32''$ de holgura y hacer centro para el radio exterior en la intersección de las rectas del inciso anterior, sin pasarse del círculo límite de tubos.

Figura 9. Plantilla de barrenado de espejos



Fuente: Ingenio Tululá.

4.12. Cálculo del beneficio económico

De acuerdo al listado de materiales y de actividades del apéndice 6 y anexo 5, el costo de materiales utilizados es de Q 532 104,00 y el de mano de obra es de Q 58 500 haciendo un total de Q 590 604,00.

El Ingenio Tululá cuenta con tres turbogeneradores principales que son alimentados por tres calderas. De acuerdo a la eficiencia de los turbogeneradores, se ha obtenido un índice que relaciona esa eficiencia con las libras de vapor directo que consumen y corresponde a 1 kwh/12,86 lbs de vapor.

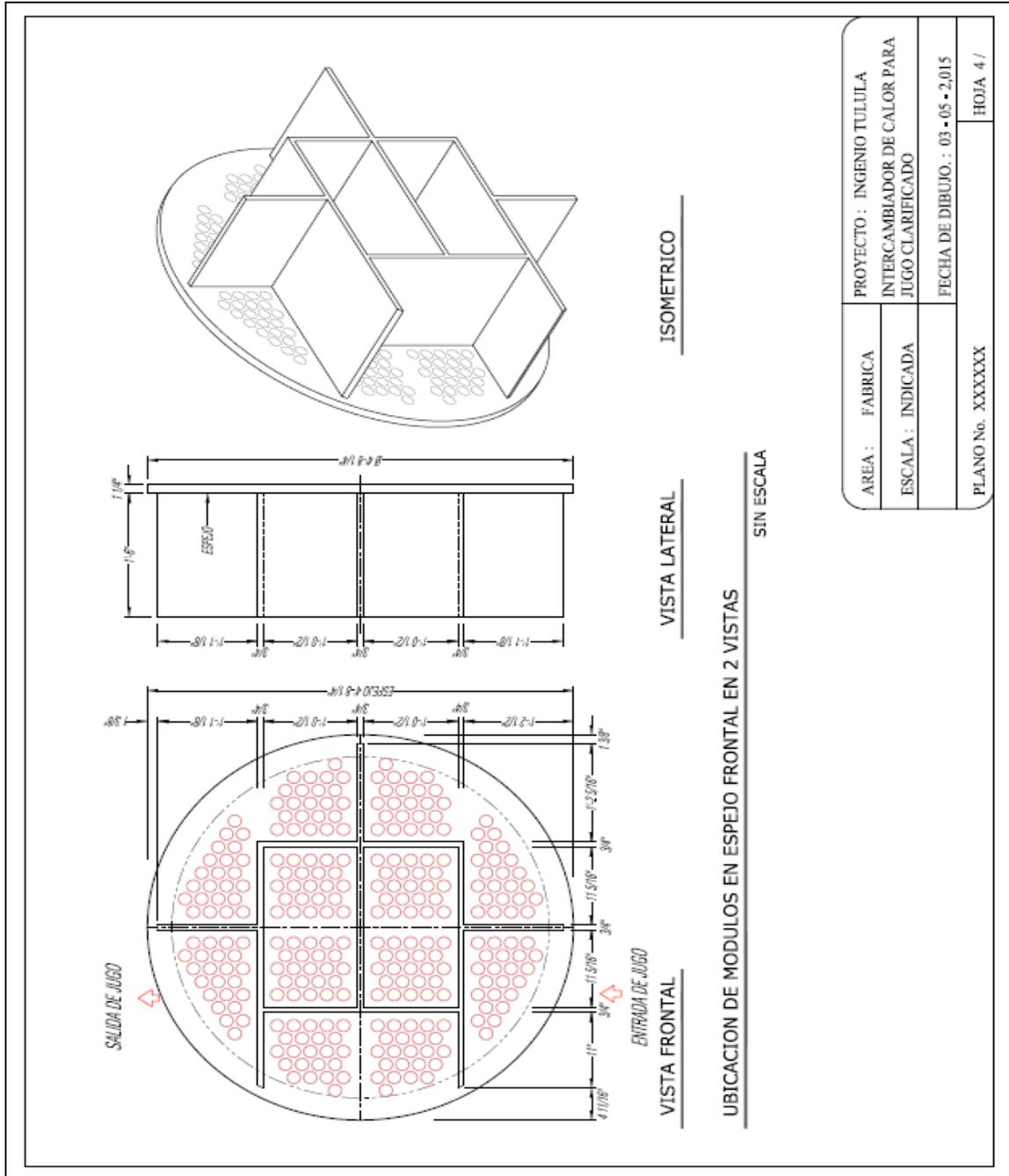
El sistema de evaporación consta de un preevaporador que se alimenta con vapor de escape y dos tándem de evaporadores de 5 vasos cada uno. El primer evaporador de cada tándem consume vapor de escape y los restantes consumen vapor vegetal del vaso anterior a ellos. No obstante, siempre hay un evaporador en limpieza, por lo que el sistema generalmente está trabajando una línea con quintuple y otra línea con cuádruple efecto. De acuerdo a la cantidad de vapor extraído del preevaporador, trabajando en un sistema de evaporación de cuádruple efecto y aplicando uno de los principios de múltiple efecto de Riellux, se tiene:

$$10\ 486,45 \text{ lbs vapor/h} * \frac{1}{4} = 2\ 621,61 \text{ lbs de vapor escape de ahorro}$$

Traduciendo este ahorro en moneda nacional y utilizando el índice de eficiencia de los turbogeneradores, se tiene:

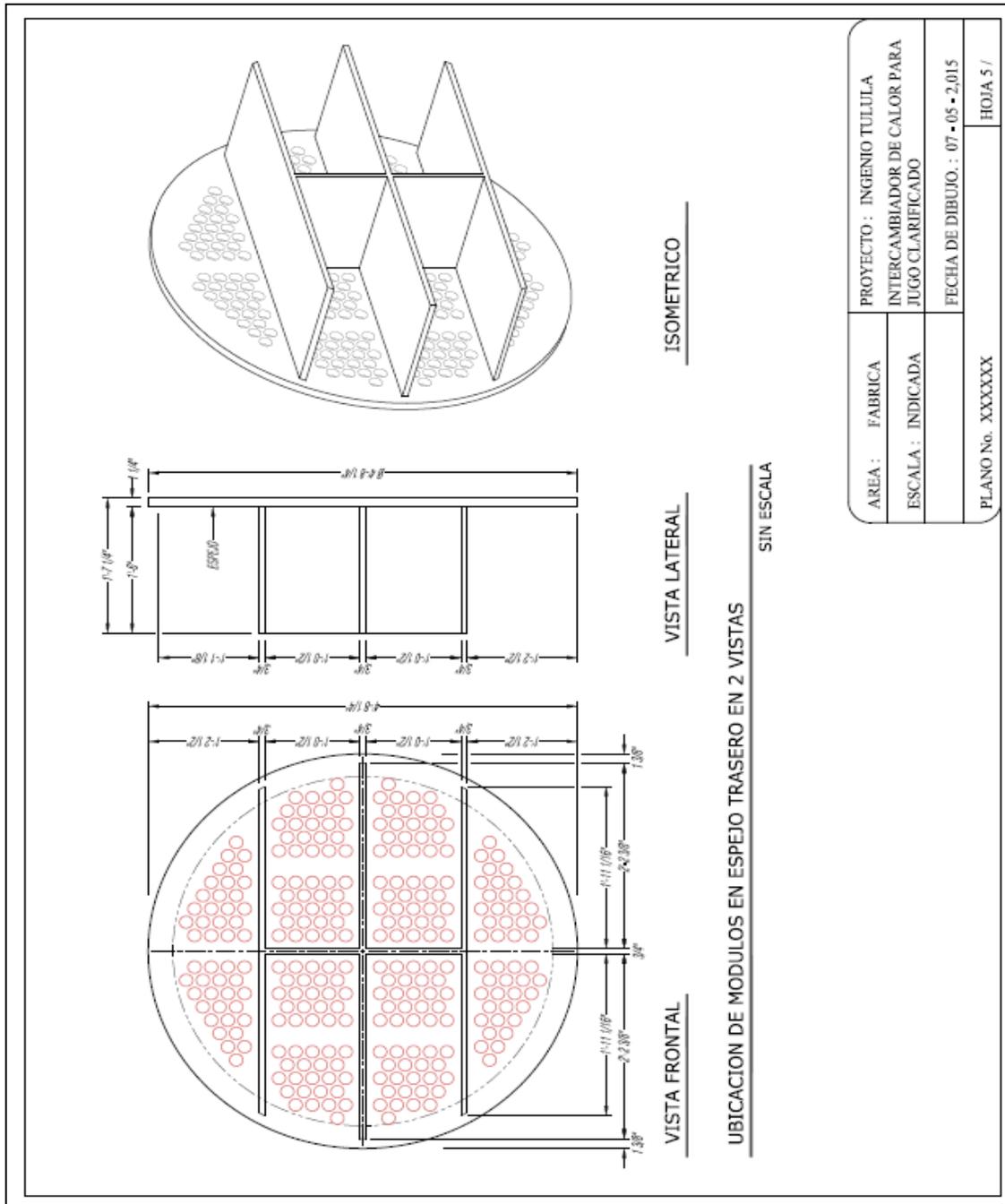
$$2\ 621,61 \text{ lbs vapor/h} * 1\text{kwh}/12,86 \text{ lbs vapor} * 24 \text{ h/día} * 180 \text{ días zafra} * \\ \$\text{USD } 0,065/1 \text{ kwh} * \text{Q } 8,00/1\$ \text{USD} = \text{Q } 457\ 945,93$$

Figura 11. Plano de vista isométrica de espejo frontal



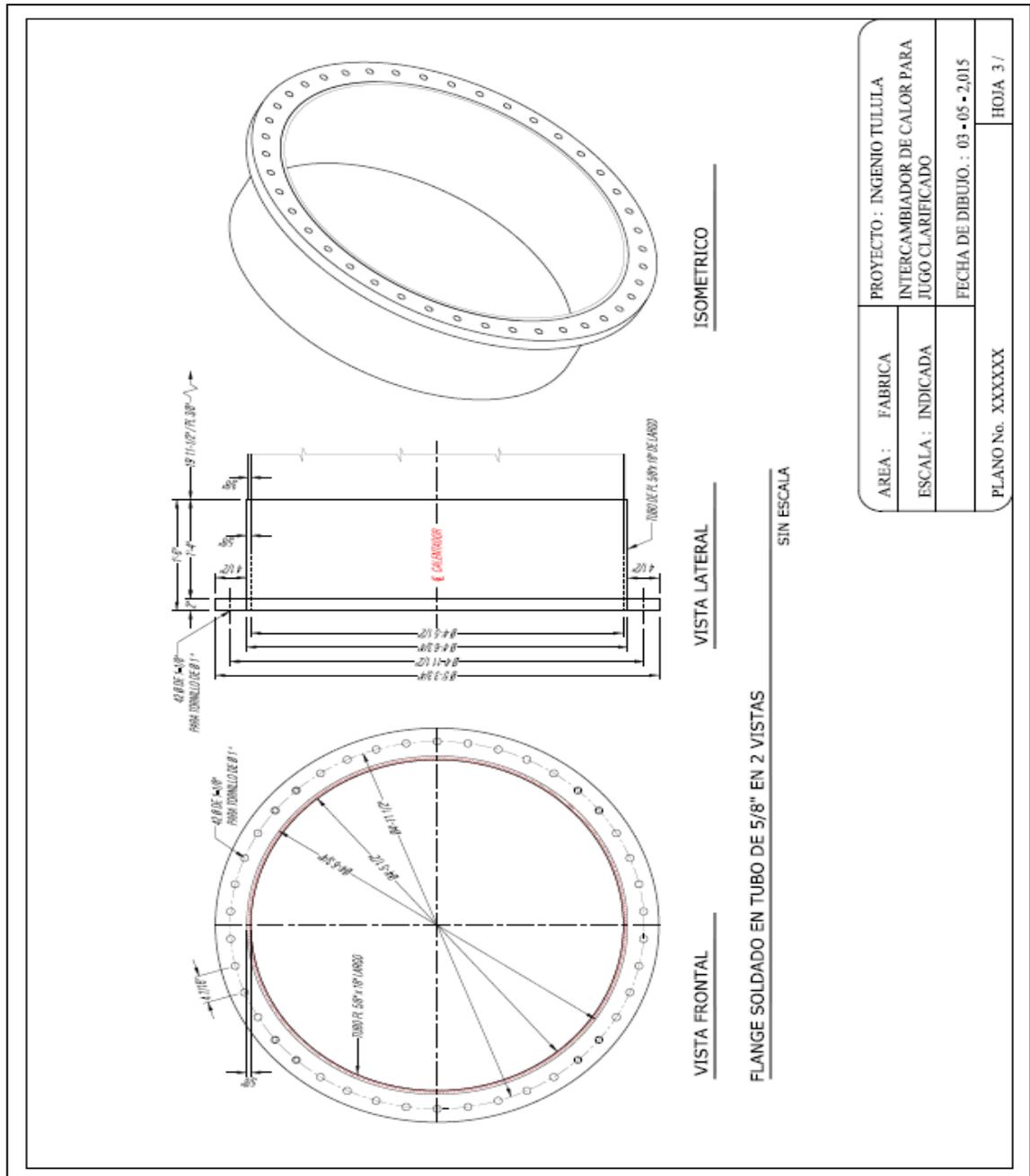
Fuente: Ingenio Tululá.

Figura 12. Plano de vista isométrica de espejo posterior



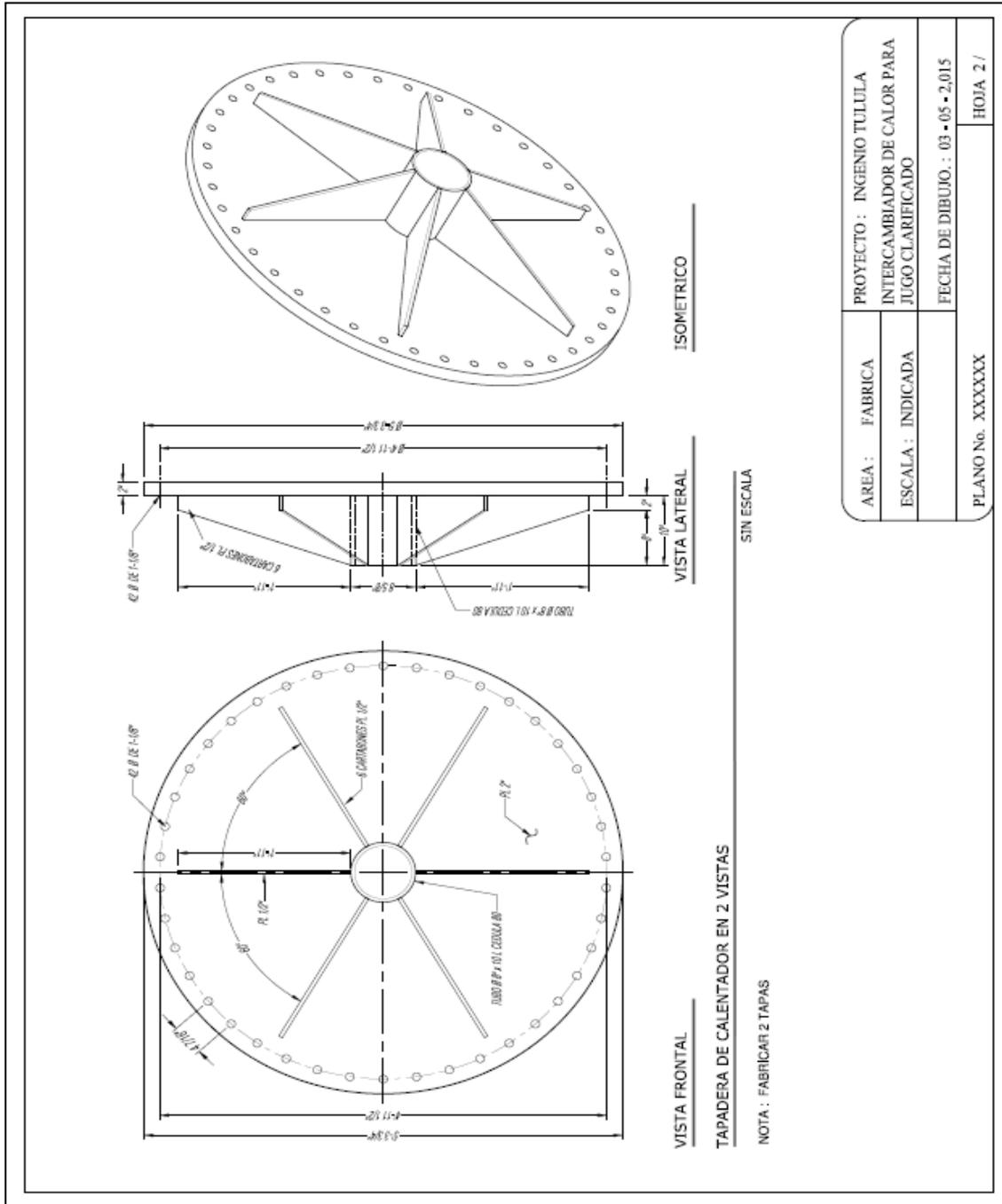
Fuente: Ingenio Tululá.

Figura 13. Plano de vista isométrica de niple de 5/8" de espesor con su flange



Fuente: Ingenio Tululá.

Figura 14. Plano de vista isométrica de tapas



Fuente: Ingenio Tululá.

5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

El apéndice 2 muestra la caracterización del equipo diseñado. Se describen las condiciones ideales de operación para una molida de 6 500 Ton/día lo cual genera un flujo de jugo de 552 555 lbs/h, ingresando al intercambiador de calor a 202 °F, con una velocidad de 7 pies/s a través de una superficie de calentamiento de 2 524 pies cuadrados, conformada de 276 tubos de cobre 16 BWG de 1 ¾" de diámetro y 20 pies de largo, distribuidos en 12 pases de 23 tubos cada uno. Esto se realiza por medio del vapor, cuya temperatura al ingresar al cuerpo del intercambiador de 53 ½ " de diámetro interno es de 237 °F con una presión de 6 psig, y recorre la tubería de cobre para salir con una temperatura de 222 °F.

Se logra cumplir con el logro del beneficio económico alcanzado, pero es necesario operar el equipo en las condiciones indicadas en la caracterización. También se deben cumplir las condiciones de ahorro en un sistema de evaporación planteado por Riellux y que se mantenga el índice de eficiencia de los turbogeneradores junto al costo indicado de la energía por kilowatt por hora.

Los objetivos de escalamiento en las condiciones de operación del equipo y la aplicación de los conocimientos adquiridos en la transferencia de calor en el proceso de producción de azúcar se ven cumplidos y plasmados en la obtención y uso de las diferentes fórmulas de los cálculos para el diseño del equipo, así como en la caracterización del mismo. Este equipo puede trabajar bajo otras condiciones que no están en esta caracterización, es decir, si las condiciones de operación del proceso cambian, el equipo puede hacerse más o menos eficiente. Por ejemplo, si la temperatura del vapor o del jugo a la

entrada del intercambiador aumenta o disminuye, la temperatura del jugo a la salida del intercambiador también va a aumentar o disminuir.

Existen otras condiciones como el aumento o disminución de la cantidad del flujo de jugo que ingresa al intercambiador de calor que también hará que cambie la eficiencia del equipo. Debido a esto se considera que las condiciones ideales para operar el intercambiador de calor son las indicadas en el anexo 2.

El intercambiador de calor está diseñado con una área de 2 524 pies cuadrados de 276 tubos de cobre BWG 16 de 1 $\frac{3}{4}$ " y 20 pies de largo, distribuidos en 12 pases de 23 tubos cada uno para que la velocidad del jugo se mantenga en 7 pies/s. Esta condición es importante porque la velocidad de incrustación en los tubos de cobre depende de la desviación de ese parámetro, ya que se sabe que si la velocidad disminuye mucho, la incrustación aumenta y, por el contrario, disminuye a medida que va acercándose al parámetro indicado. Sin embargo, un aumento de la velocidad en el jugo hace que aumente la caída de presión, lo que hará pensar en un equipo de bombeo de mayor potencia.

Para que el equipo diseñado opere de manera óptima, es muy importante que tenga un mantenimiento preventivo adecuado, lo que se relaciona principalmente con la remoción de las incrustaciones en el interior de la tubería de cobre. Esta limpieza se debe hacer de manera mecánica, aprovechando la bomba hidrolavadora de alta presión del Ingenio, pero manteniendo un control de la temperatura de salida del jugo clarificado, con un manómetro instalado. Esta será una forma de alertar sobre la eficiencia con que está operando el intercambiador de calor, siempre que la temperatura y presión del vapor se mantenga.

6. LOGROS OBTENIDOS

Estos se resumen principalmente en la obtención del área de transferencia que permite lograr la temperatura requerida en el jugo clarificado, todo esto queda plasmado en los planos respectivos del diseño del equipo.

También, otro logro alcanzado es la determinación del beneficio económico conseguido con el diseño del equipo, mediante el aprovechamiento del vapor vegetal y el consiguiente ahorro de vapor de escape.

La caracterización del equipo diseñado es otro logro, porque permite conocer los parámetros de operación del intercambiador de calor que garantizan su mejor eficiencia, así como predecir los resultados según las variaciones en la operación del equipo por algún parámetro como jugo, vapor, temperaturas y mantenimiento.

CONCLUSIONES

1. El intercambiador de calor diseñado tiene la capacidad requerida para un flujo de jugo clarificado de 552 555 lbs/h de acuerdo a una molida de 6 500 Ton/día.
2. El área calculada del intercambiador de 2 524 pies² de superficie calórica, tiene la capacidad necesaria para manejar la cantidad de calor de 10 056 501 BTU/h que se transfieren en el sistema.
3. Con el intercambiador de calor diseñado de 20 pies de largo por 53,5" de diámetro interno, con tubos de cobre de 20' de largo 16 BWG distribuidos en 12 pases de 23 tubos cada uno, se puede lograr el aumento de temperatura por encima del punto de ebullición del jugo clarificado y así aprovechar mejor la capacidad de la superficie calórica de los evaporadores.
4. La inversión realizada es de Q 590 604,00 y la recuperación del capital invertido retorna prácticamente en una zafra, por lo que el beneficio económico obtenido de aquí en adelante es de Q 458 000,00.
5. Con las variaciones de temperatura de vapor y flujo de jugo se pueden tener también variaciones en la eficiencia del intercambiador de calor.

RECOMENDACIONES

1. El intercambiador de calor de carcaza y tubos fue diseñado para una capacidad de operación en molienda de 6 500 Ton/día. Al superar esta capacidad, el equipo puede disminuir su eficiencia en la transferencia de calor, lo que ocasionaría una menor temperatura del jugo en la salida.
2. Se debe tener un monitoreo constante de las condiciones de operación del equipo mediante la instalación de un manómetro y termómetro, ya que esto permite controlar las variaciones en presión y temperatura, lo que puede afectar su eficiencia y ayuda a determinar la necesidad de limpieza del equipo.
3. El agua condensada que se produce en el intercambiador es un fluido que debe ser controlado constantemente por el Laboratorio de Control de Calidad, para evitar posibles arrastres de sacarosa que originen pérdidas en el proceso.
4. La limpieza del equipo debe ser de manera mecánica, aprovechando la bomba de alta presión, de esta manera no solamente se hace más rápido y económico, sino que se contribuye al medio ambiente al evitar la limpieza química.
5. Este equipo debe ser construido por personal propio del Ingenio, ya que están capacitados y con experiencia para ello. Además, resulta mucho más económico que encargar la construcción a compañías ajenas.

BIBLIOGRAFÍA

1. *Baffles para intercambiador de calor.* [en línea]. <<https://www.google.com.gt/baffles+para+intercambiadores+de+calor>>. [Consulta: abril de 2015].
2. BALOH, Tone; WITTEWER, Enrique. *Manual de energía para fábricas de azúcar.* 2a. ed. Alemania: Druckhaus am treptower park, 1995. 201 p.
3. BRANAN, R. Carl. *Soluciones prácticas para el ingeniero químico.* 2a. ed. México: McGraw-Hill, 1978. 418 p.
4. CHEN, James. *Manual de la caña de azúcar.* México: Limusa, 1991. 203 p.
5. GEANKOPLIS, J. Christie. *Procesos de transporte y operaciones unitarias.* 3a. ed. México: Compañía Editorial Continental, S.A., 1998. 1008 p.
6. HONIG, Pieter. *Principios de tecnología azucarera.* México: Compañía Editorial Continental, S. A., 1982. 645 p.
7. HUGOT, E. *Manual del ingeniero azucarero.* México: Limusa 1960. 872 p.

8. KERN, Q. Donald. *Procesos de transferencia de calor*. México: Compañía Editorial Continental, S.A., 1999. 981 p.
9. MANRIQUE, José A. *Transferencia de calor*. México: Tec- Cien, 1976. 204 p.
10. PERRY, Robert H. y GREEN, Don W. *Manual del ingeniero químico*. 7a. ed. Estados Unidos: McGraw Hill, 1997. 1862 p.
11. REIN, Peter. *Ingeniería de la caña de azúcar*. Berlin: Barlens, 2012. 872 p.
12. *Transferencia de calor*. [en línea]. <<http://www.tlv.com/global/LA/calculator/steam-table> pressure.html>. [Consulta: abril de 2015].

APÉNDICES

Apéndice 1. **Selección de materiales y análisis de costos**

Aquí deben incluirse todos los requerimientos, en cuanto a servicio, que se desea que cumplan los materiales. Para que esto suceda, los materiales deben cumplir ciertas propiedades mecánicas, como alta resistencia a la tensión y un alto porcentaje de alargamiento. Además, deberán cumplir con ciertas propiedades físicas, como el coeficiente de dilatación térmica, resistencia a la corrosión química, que sea maquinable, soldable, de fácil formación y compatible con el equipo ya existente, así como la durabilidad y costo final.

También deben ser tomadas en cuenta las características de los fluidos que intervienen en el proceso, como temperatura, presión, velocidad, pH, contenido de impurezas, entre otros.

Por todo lo anterior y sabiendo la función que desempeña cada parte del equipo, se debe utilizar la experiencia con equipos similares y los reportes que se tengan del comportamiento de los materiales empleados en ellos, ya que estas son las fuentes más confiables para seleccionarlos, tomando siempre en consideración el mejor balance en cuanto a que los materiales cumplan la mayor cantidad de requisitos y el costo de inversión, operación y mantenimiento de los mismos.

Continuación del apéndice 1.

- Carcaza, cabezal y tapas

Estas partes del equipo están sometidas a contacto directo con los fluidos por lo que se deben seleccionar materiales que soporten el ataque corrosivo, generalmente se utiliza acero al carbón con un espesor adecuado y, en el caso de las tapas, aunque tienen una protección previa del empaque, deben soportar los ataques de erosión debido a los fuertes chorros de flujo de jugo de frente a ellas en los diferentes pasos del intercambiador. Por lo tanto, bien pueden utilizarse materiales de acero al carbón pero con un espesor mayor y en ningún caso menor al de la carcaza y cabezal.

En la clasificación general de tapas existen abombadas y planas, estas últimas son desmontables por medio de una especie de bisagra metálica que la hace abatible y lleva una brida con agujeros para pernos en toda la periferia que coinciden con los agujeros de la brida en toda la periferia del cabezal, de tal manera que cuando se quiere abrir o cerrar el intercambiador, solamente hay que quitar los pernos.

- Espejos

Debe tenerse especial cuidado al ataque corrosivo por las condiciones de servicio, ya que estas piezas estarán sometidas a situaciones de temperatura y presión en ambas caras y porque, además, deberán asegurar que permanezca un perfecto sello entre el vapor del lado de la carcaza y el jugo dentro de los tubos. El material puede ser seleccionado de acero al carbón, pero de un espesor adecuado.

Continuación del apéndice 1.

- Empaques

Los empaques se pueden seleccionar de un material sintético y algunas veces, dependiendo de la presión y temperatura de trabajo, con inserción de metal. También puede utilizarse neopreno especial que soporte las temperaturas y presiones a las que estará sometido, siempre y cuando sean flexibles y comprimibles para que sean capaces de llenar todos los huecos por donde pudieran existir fugas.

- Mamparas o placas divisorias

Van soldadas a los espejos, y son las que separan los pases y junto al cabezal le dan dirección de entrada y salida al flujo de jugo, cuando este choca con las tapas del intercambiador, por lo que el material que se seleccione debe ser del mismo tipo que para los espejos. Sin embargo debe tomarse en cuenta el espesor del material, porque si es de lámina muy delgada se corre el riesgo de que, al comprimirlo con la tapa, el empaque se pueda cortar y dar lugar a filtraciones, lo que reduciría su vida útil.

- Baffles

Se seleccionan del mismo material que la carcasa, cabezal y tapas, pero teniendo especial cuidado en el espesor de lámina que se utilice porque estas piezas son muy difíciles de cambiar y como internamente están soportando el haz de tubos, deben poder manejar muy bien la erosión y el desgaste ya que de no ser así provocarían vibraciones en los tubos y el desprendimiento de los

Continuación del apéndice 1.

mismos con el consiguiente problema de contaminación del agua condensada y pérdidas de sacarosa

- Análisis de costos
 - Materiales
 - Cálculo del área de una lámina

Generalmente se utilizan láminas con dimensiones que van de 6 pies x 10 pies a 6 pies x 20 pies, entonces se calcula el área de esta lámina. Seguidamente, se calcula el área de la pieza que se va a fabricar y se procede a hacer una relación de áreas, tanto de la lámina como de la pieza a fabricar, y así obtener la cantidad de láminas que se necesitan.

Como estos materiales son muy utilizados en el Ingenio, ya se tienen los costos unitarios de cada uno de ellos y, al multiplicarlo por la cantidad necesaria, se obtiene el costo del material para fabricar la pieza. De esta manera se procede con el resto de las piezas, hasta tener el costo total de los materiales necesarios para la construcción del intercambiador de calor diseñado.

En algunas piezas específicas, como la tubería interna, tornillería o válvulas, únicamente se calcula la cantidad que se necesita y, por el precio que se sabe, se tiene el costo de estos materiales. La lista de estos está en el anexo 5 y da como resultado Q 532 104.

Continuación del apéndice 1.

- Mano de obra

Es más económico, desde todo punto de vista, fabricar el intercambiador de calor en la misma empresa y con el mismo personal con que se cuenta, ya que este personal es el que por muchos años ha fabricado la mayoría de equipos en el Ingenio, en donde incluso ya hay especialistas en su área.

Se inicia haciendo una lista de actividades con tiempos específicos para cada una, asignado personal responsable para realizarlas, utilizando para ello algún programa de computadora especialmente diseñados para este tipo de actividades, como Project, el cual permite darle seguimiento al avance del proyecto desde su inicio hasta su finalización, pudiendo hacer las correcciones necesarias conforme el proyecto va avanzando.

De acuerdo a las actividades programadas y listadas en el anexo 6, el costo de mano de obra del proyecto, para hacerlo en un tiempo promedio de 30 días y con el salario diario más las prestaciones respectivas de cada colaborador, es de Q 58 500,00.

Todo lo anterior indica que la inversión a realizar en materiales y mano de obra es de Q 590 604,00

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. **Caracterización del intercambiador de calor de carcaza y tubos**

Presión entrada de vapor	6 psig
Temperatura de entrada de vapor	237 °F
Flujo másico de jugo clarificado	552 555 lbs/h
Temperatura de jugo clarificado en la entrada	202 °F
Temperatura de jugo clarificado en la salida	222 °F
Tipo de tubería	Cobre 16 BWG
Diámetro externo de la tubería	1,75 pulg.
Largo de los tubos	20 pies
Núm. de pases	12
Núm. de tubos en cada pase	23
Núm. total de tubos	276
Superficie calórica total	2 524 pies ²
Diámetro interno de la carcaza	53,5

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 3. **Equipos y accesorios en el intercambiador de calor de carcaza y tubos**

- Tubería, válvula y manómetro para entrada de agua alrededor de la calandria

El intercambiador de calor debe tener la instalación de una tubería con su respectiva válvula y manómetro, para el ingreso del agua al cuerpo cilíndrico por donde ingresa el vapor, para hacer pruebas hidrostáticas en el equipo. Estas pruebas se hacen cuando el equipo va a entrar en operación o cuando se ha cambiado algún tubo de transferencia que estaba flojo o roto.

Continuación del apéndice 3.

De esta manera se verifica que no se esté mezclando el vapor de la calandria con el jugo del haz de tubos, porque esto provoca pérdidas de sacarosa en el agua condensada.

El procedimiento consiste en abrir las tapas del intercambiador y cerrar las válvulas de vapor, drenaje y salidas de condensados, para que el agua ejerza cierta presión por algunos minutos sobre los tubos de transferencia y de esta manera revisar en los espejos la existencia de fugas en el equipo. Algunas veces, si el tubo está flojo, solo se aprieta un poco más al espejo con una herramienta llamada *expander*. En otras ocasiones será necesario cambiar el tubo completamente, siempre apretándolo al espejo.

Cuando el equipo está en operación, si las fugas son grandes se detectan a simple vista, porque el agua condensada sale con un color parecido al jugo. Pero, si son solo trazas, estas pueden detectarse mediante análisis de laboratorio.

- Tubería y válvula para entrada de agua al haz de tubos

Se debe tener una instalación de tubería con su respectiva válvula para ingreso de agua por la tubería de transferencia, con el objetivo de verificar fugas en las tuberías de entrada y salida de jugo, así como en las juntas de las tapas. Además, esta tubería también se puede utilizar para la limpieza química de los tubos de transferencia, si es que se utiliza en este equipo, ya que últimamente se ha optado por la limpieza mecánica.

Continuación del apéndice 3.

El procedimiento consiste en cerrar las válvulas de entrada, salida y drenaje de jugo y hacer cierta presión con el agua que ingresa por algunos minutos para verificar dichas fugas. Si hay fugas en los tubos, deben ser reparadas con soldadura, y si es en las tapas, se deberá ajustar el apriete de los pernos.

- Tubería y válvula para agua condensada

Generalmente el agua condensada que se produce en los intercambiadores de calor no se utiliza como agua de alimentación de las calderas, pero sí se utiliza en áreas como tachos, en molinos como agua de imbibición o en intercambiadores de calor líquido-líquido para precalentar el jugo.

Esta agua se produce luego de que el vapor, que sirve como medio de calentamiento, ha cedido su energía y se condensa. Se debe tener instalada una tubería con su respectiva válvula para su desalojo mediante la apertura total de dicha válvula cuando el equipo está en operación, utilizando un sifón, trampas de vapor o sistemas automáticos para evitar pérdidas de vapor.

Es muy importante el desalojo de esta agua porque, de no ser así, ocasiona fuertes golpes en el equipo que son perceptibles y pueden llegar a aflojar los tubos de transferencia, formando además una capa aislante que no permite la correcta transferencia de calor entre el vapor y los tubos, con la consiguiente pérdida de eficiencia del equipo.

- Tubería y válvula para gases incondensables

- Continuación del apéndice 3.

Debe haber una instalación de tubería y válvula abierta parcialmente a la atmósfera para el desalojo de gases incondensables que acompañan al vapor cuando ingresa al intercambiador, pero que no logran condensar.

Estos gases, como el aire, ocasionan una reducción en la capacidad de intercambiador de calor si se quedan atrapados dentro del equipo, ya que forman una capa aislante que no permite la transferencia de calor entre el vapor y el haz de tubos. La válvula se regula en su abertura para no perder vapor en el equipo.

- Tubería y válvula de drenaje

El equipo debe contar con una tubería y válvula para drenaje para desalojar el agua que se ha utilizado para las diferentes pruebas hidrostáticas realizadas. También se utiliza esta instalación para desalojar todo el jugo que queda en los tubos de transferencia cuando el equipo, por algún motivo, sale de operación.

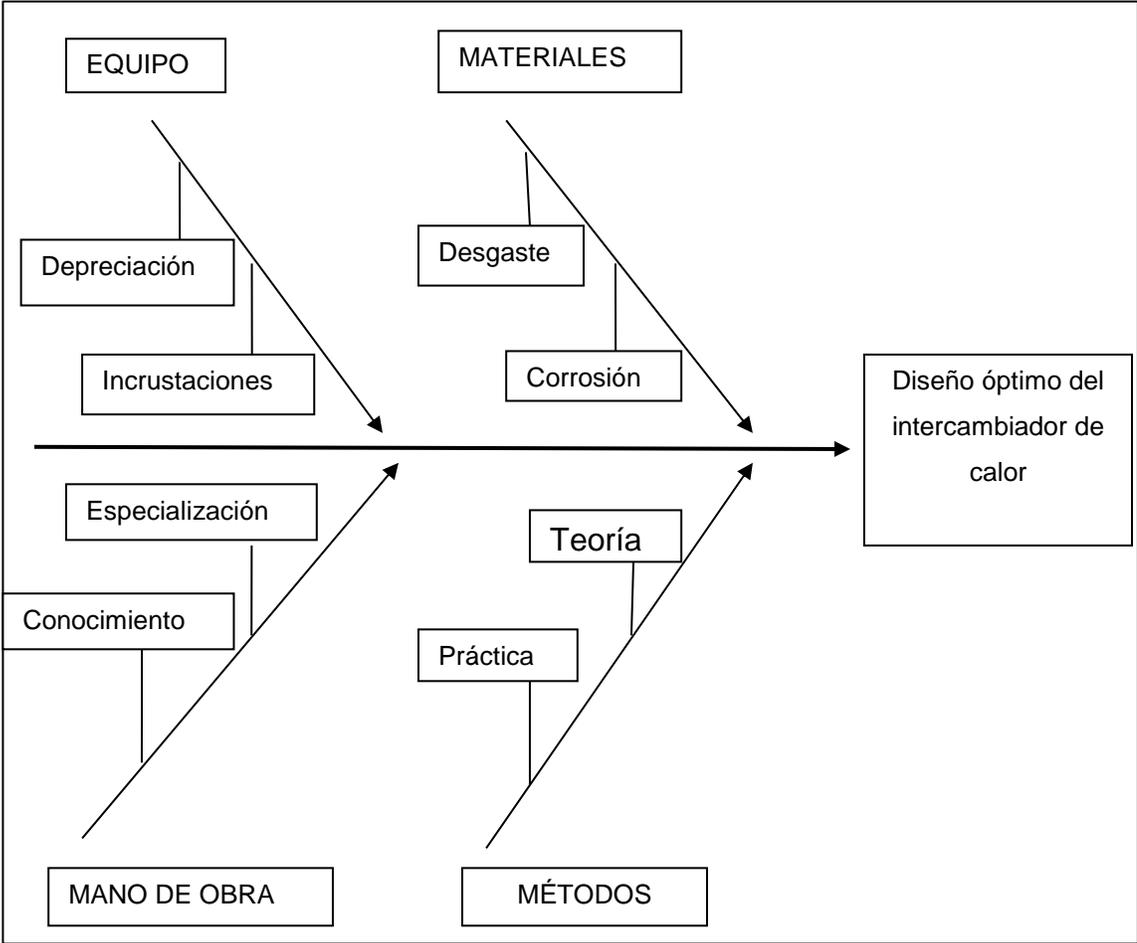
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 4. **Requisitos académicos**

NÚM.	CURSO	TEMA	APLICACIÓN EN EL DISEÑO
1	Balance de masa y energía	Balance de masa	Cálculo de flujo de jugo a la entrada del intercambiador
2	Balance de masa y energía	Balance de energía	Cálculo de la cantidad de calor necesaria para el sistema
3	Flujo de fluidos	Velocidad de diseño	Velocidad del jugo
4	Transferencia de calor	Transferencia de calor por conducción	Cálculo de la cantidad de calor transferido
5	Procesos químicos	Proceso industrial del azúcar de caña	Especificaciones del proceso
7	Diseño de equipo	Ecuaciones de diseño	Relaciones teórico-práctica en el diseño
8	Diseño de equipo	Diseño de un intercambiador de calor	Relaciones teórico-práctica en el diseño
9	Termodinámica	Leyes de la Termodinámica	Criterios para relaciones primarias del diseño
10	Ingeniería económica	Análisis de costos	Cálculo del beneficio económico

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 5. Diagrama de causa y efecto



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 6. **Materiales para construcción de un calentador de jugo**

MATERIAL	USO
Láminas H.N. 1/2" X 6' X 20'	Refuerzos de tapas y mamparas p/vapor
Láminas H.N. 5/8" X 4' X 10'	Anillos en extremos del cuerpo
Láminas H.N. 3/8" X 6' X 20'	Cuerpo
Láminas H.N. 1 1/4" X 6' X 10'	Espejos de la calandria
Láminas H.N. 2" X 6' X 10'	Tapas
Tubos cobre 1 3/4" X 20' BWG	Tubería de cobre de calandria
Tornillos 1" x 6 1/2" con tuercas	Tapas
Roldana plana de 1"	Soldadura general
Válvula de compuerta de 20"	Entrada de vapor
Válvulas de 1" rosca de bronce	Gases incondensables
Empaques grafitados	Tapas
Pares de guantes al puño	Soldadura general
Brocas de 3/4" x 12"	Barrenado de espejos
Brocas de 1 3/4"	Barrenado de espejos
Válvulas de 8" H.N. V. S. 125 PSI	Entrada y salida de jugo y agua condensada
Válvulas de 4" H.N. V. S. 125 PSI	Entrada y salida agua
Lbs. electrodo 6011 de 1/8"	Soldadura general
Lbs. electrodo 7018 de 1/8"	Soldadura general
Cilindros de oxígeno	Soldadura general
Cilindros de acetileno	Soldadura general
Refrentar tapas y flanges	Taller externo

Fuente: elaboración propia.

ANEXOS

Anexo 1. Balance de materiales en diseño Ingenio Tuluá

INGENIO TULULÀ							
Tratamiento de jugo							
<u>Balance de materiales en diseno</u>							
						Molienda diaria	6500.00 TCD
						Molienda efectiva diaria	6632.65 TCD
						Rata de molienda	276.36 Ton/h
Material	Libras por Hora						
	% Caña	Brix	Pol	Pureza	Peso	Humedad	Fibra
Caña	100.00	98,716	71,688		552,721		68,648
Análisis de la Caña		17.86	12.97	72.62			12.42
Agua de lmbibición	25.91				143,210		
Bagazo	26.14	4,479	2,485		144,481	72,371	68,643
Análisis del Bagazo		3.10	1.72	55.48		50.09	47.51
Jugo diluído	99.77	83,048	69,042		551,450		
Análisis de Jugo diluído		15.06	12.52	83.13			
Jugo Alcalizado	106.03	91,072	80,992		586,050		
Análisis de Jugo alcalizado		15.54	13.82	83.45			
Lechada de Cal	0.75				4,145		
Agua de lavado de filtros	3.00				16,582		
Jugo Filtrado	5.51	3,670	2,918		30,455		
Análisis de Jugo filtrado		12.05	9.58	79.50			
Torta de Cachaza	3.55	392	320		19,622		
Análisis de Torta de Cachaza		2.00	1.63				
Cachaza a los filtros	6.06	3,989	3,349		33,495		
Análisis de Cachaza a filtros		11.91	10.00	83.96			
Jugo Claro	99.97	82,883	69,511		552,555		
Análisis de Jugo Claro		15.00	12.58	83.87			
Evaporación	76.15				420,905		
Meladura	23.82	81,979	69,511		131,650		
Análisis de Meladura		62.27	52.80	84.79			

Fuente: información proporcionada por el Ingenio Tuluá.

Anexo 2. Brix y densidades de jugo

Tabla 19. (Continuación)

Grado Brix	Peso (lb) en el aire de		Libras de sólidos (o Brix) por		Grado Brix	Peso (lb) en el aire de		Libras de sólidos (o Brix) por	
	1 pie cúbico	1 gal	1 pie cúbico	1 gal		1 pie cúbico	1 gal	1 pie cúbico	1 gal
12.0	65.260	8.724	7.831	1.047	19.0	67.138	8.975	12.756	1.705
.2	65.312	8.731	7.968	1.065	.2	67.198	8.983	12.902	1.725
.4	65.365	8.738	8.105	1.083	.4	67.250	8.990	13.047	1.744
.6	65.417	8.745	8.243	1.102	.6	67.302	8.997	13.191	1.763
.8	65.470	8.752	8.380	1.120	.8	67.362	9.005	13.338	1.783
13.0	65.522	8.759	8.518	1.139	20.0	67.414	9.012	13.483	1.802
.2	65.574	8.766	8.656	1.157	.2	67.474	9.020	13.630	1.822
.4	65.627	8.773	8.794	1.176	.4	67.527	9.027	13.776	1.842
.6	65.686	8.781	8.933	1.194	.6	67.579	9.034	13.921	1.861
.8	65.739	8.788	9.072	1.213	.8	67.639	9.042	14.069	1.881
14.0	65.791	8.795	9.211	1.231	21.0	67.691	9.049	14.215	1.900
.2	65.844	8.802	9.350	1.250	.2	67.751	9.057	14.363	1.920
.4	65.896	8.809	9.489	1.268	.4	67.803	9.064	14.510	1.940
.6	65.948	8.816	9.628	1.287	.6	67.863	9.072	14.658	1.959
.8	66.001	8.823	9.768	1.306	.8	67.916	9.079	14.806	1.979
15.0	66.053	8.830	9.908	1.325	22.0	67.975	9.087	14.955	1.999
.2	66.105	8.837	10.048	1.343	.2	68.028	9.094	15.102	2.019
.4	66.165	8.845	10.189	1.362	.4	68.088	9.102	15.252	2.039
.6	66.218	8.852	10.330	1.381	.6	68.140	9.109	15.400	2.059
.8	66.270	8.859	10.471	1.400	.8	68.200	9.117	15.550	2.079
16.0	66.322	8.866	10.612	1.419	23.0	68.260	9.125	15.700	2.099
.2	66.375	8.873	10.753	1.437	.2	68.312	9.132	15.848	2.119
.4	66.434	8.881	10.895	1.456	.4	68.372	9.140	15.999	2.139
.6	66.487	8.888	11.037	1.475	.6	68.424	9.147	16.148	2.159
.8	66.539	8.895	11.179	1.494	.8	68.484	9.155	16.299	2.179
17.0	66.592	8.902	11.321	1.513	24.0	68.544	9.163	16.451	2.199
.2	66.644	8.909	11.463	1.532	.2	68.596	9.170	16.600	2.219
.4	66.704	8.917	11.606	1.551	.4	68.656	9.178	16.752	2.239
.6	66.756	8.924	11.749	1.571	.6	68.709	9.185	16.902	2.259
.8	66.809	8.931	11.892	1.590	.8	68.768	9.193	17.054	2.280
18.0	66.868	8.939	12.036	1.609	25.0	68.828	9.201	17.207	2.300
.2	66.921	8.946	12.180	1.628	.2	68.881	9.208	17.358	2.320
.4	66.973	8.953	12.323	1.647	.4	68.940	9.216	17.511	2.341
.6	67.033	8.961	12.468	1.667	.6	69.000	9.224	17.664	2.361
.8	67.085	8.968	12.612	1.686	.8	69.060	9.232	17.817	2.382

Fuente: CHEN, James. *Manual de la caña de azúcar*. p. 1 126.

Anexo 3. Valores característicos para agua y vapor saturado (SI)

ϑ °C	p bar	h' kJ/kg	h'' kJ/kg	r kJ/kg	e' kJ/kg	e'' kJ/kg	ϑ °C	p bar	h' kJ/kg	h'' kJ/kg	r kJ/kg	e' kJ/kg	e'' kJ/kg
20	0,023	83,9	2 538,2	2 454,3	27,55	27,6	67	0,273	280,4	2 621,8	2 341,4	41,8	365,3
21	0,025	88,0	2 540,0	2 452,0	27,57	35,9	68	0,286	284,6	2 623,5	2 338,9	42,4	371,5
22	0,026	92,2	2 541,8	2 449,6	27,60	44,2	69	0,298	288,8	2 625,2	2 336,4	43,0	377,6
23	0,028	96,4	2 543,6	2 447,2	27,65	52,4							
24	0,030	100,6	2 545,5	2 444,9	27,72	60,7	70	0,312	293,0	2 626,9	2 334,0	43,6	383,6
							71	0,325	297,2	2 628,6	2 331,5	44,2	389,7
25	0,032	104,8	2 547,3	2 442,5	27,8	68,7	72	0,340	301,4	2 630,3	2 329,0	44,8	395,7
26	0,034	109,0	2 549,1	2 440,2	27,9	76,8	73	0,354	305,6	2 632,0	2 326,5	45,4	401,7
27	0,036	113,1	2 550,9	2 437,8	28,0	84,8	74	0,370	309,7	2 633,7	2 324,0	46,1	407,6
28	0,038	117,3	2 552,7	2 435,4	28,1	92,7							
29	0,040	121,5	2 554,5	2 433,1	28,2	100,6	75	0,386	313,9	2 635,4	2 321,5	46,8	413,5
							76	0,402	318,1	2 637,1	2 318,9	47,4	419,4
30	0,042	125,7	2 556,4	2 430,7	28,3	108,0	77	0,419	322,3	2 638,7	2 316,4	48,1	425,2
31	0,045	129,8	2 558,2	2 428,3	28,4	116,3	78	0,437	326,5	2 640,4	2 313,9	48,7	431,0
32	0,048	134,0	2 560,0	2 425,9	28,5	124,0	79	0,455	330,7	2 642,1	2 311,4	49,5	436,8
33	0,050	138,2	2 561,8	2 423,6	28,7	131,7							
34	0,053	142,4	2 563,6	2 421,2	28,9	139,3	80	0,474	334,9	2 643,8	2 308,8	50,3	442,5
							81	0,493	339,1	2 645,4	2 306,3	51,0	448,2
35	0,056	146,6	2 565,4	2 418,8	29,2	146,9	82	0,513	343,3	2 647,1	2 303,8	51,8	453,9
36	0,059	150,7	2 567,2	2 416,4	29,4	154,4	83	0,534	347,5	2 648,7	2 301,2	52,5	459,5
37	0,063	154,9	2 569,0	2 414,1	29,6	161,9	84	0,556	351,7	2 650,4	2 298,7	53,2	465,1
38	0,066	159,1	2 570,8	2 411,7	29,8	169,3							
39	0,070	163,3	2 572,6	2 409,3	30,1	176,7	85	0,578	355,9	2 652,0	2 296,5	54,0	470,6
							86	0,601	360,1	2 653,6	2 293,1	54,8	476,1
40	0,074	167,5	2 574,4	2 406,9	30,3	184,0	87	0,625	364,3	2 655,3	2 290,9	55,5	481,7
41	0,078	171,6	2 576,2	2 404,5	30,6	191,3	88	0,650	368,5	2 656,9	2 288,4	56,3	487,1
42	0,082	175,8	2 577,9	2 402,1	30,9	198,5	89	0,675	372,7	2 658,5	2 285,8	57,1	492,5
43	0,086	180,0	2 579,7	2 399,7	31,2	206,7							
44	0,091	184,2	2 581,5	2 397,3	31,5	212,9	90	0,701	376,9	2 660,1	2 283,2	57,9	497,9
							91	0,728	381,2	2 661,7	2 280,6	58,7	503,3
45	0,096	188,4	2 583,3	2 394,9	31,8	220,0	92	0,756	385,4	2 663,4	2 278,0	59,6	508,7
46	0,101	192,5	2 585,1	2 392,5	32,1	227,0	93	0,785	389,6	2 665,0	2 275,0	60,4	514,0
47	0,106	196,7	2 586,9	2 390,1	32,4	234,1	94	0,815	393,8	2 666,6	2 272,8	61,3	519,3
48	0,112	200,9	2 588,6	2 387,7	32,8	241,0							
49	0,117	205,1	2 590,4	2 385,3	33,2	247,9	95	0,845	398,0	2 668,1	2 270,2	62,1	524,5
							96	0,877	402,2	2 669,7	2 267,5	63,0	529,7
50	0,123	209,3	2 592,2	2 382,9	33,6	254,8	97	0,909	406,4	2 671,3	2 264,9	63,8	534,9
51	0,130	213,4	2 593,9	2 380,5	34,0	261,6	98	0,943	410,6	2 672,9	2 262,2	64,7	540,1
52	0,136	217,6	2 595,7	2 378,1	34,4	268,4	99	0,978	414,9	2 674,4	2 259,6	65,6	545,2
53	0,143	221,8	2 597,5	2 375,7	34,8	275,2							
54	0,150	226,0	2 599,2	2 373,2	35,3	281,8	100	1,013	419,1	2 676,0	2 256,9	66,5	550,3
							101	1,050	423,3	2 677,6	2 254,3	67,4	555,4
55	0,157	230,2	2 601,0	2 370,8	35,7	288,5	102	1,088	427,5	2 679,1	2 251,6	68,3	560,4
56	0,165	234,4	2 602,7	2 368,4	36,1	295,1	103	1,127	431,7	2 680,7	2 248,9	69,3	565,5
57	0,173	238,5	2 604,5	2 365,9	36,6	301,7	104	1,167	436,0	2 682,2	2 246,3	70,2	570,5
58	0,181	242,7	2 606,2	2 363,5	37,1	308,2							
59	0,190	246,9	2 608,0	2 361,1	37,5	314,8	105	1,208	440,2	2 683,7	2 243,6	71,1	575,4
							106	1,250	444,4	2 685,3	2 240,9	72,1	580,4
60	0,199	251,1	2 609,7	2 358,6	38,0	321,2	107	1,294	448,6	2 686,8	2 238,2	73,0	585,3
61	0,209	255,3	2 611,4	2 356,2	38,5	327,6	108	1,339	452,9	2 688,3	2 235,4	74,0	590,1
62	0,218	259,5	2 613,2	2 353,7	39,1	334,0	109	1,385	457,1	2 689,8	2 232,7	75,0	595,0
63	0,229	263,7	2 614,9	2 351,3	39,6	340,3							
64	0,239	267,8	2 616,6	2 348,8	40,1	346,6	110	1,433	461,3	2 691,3	2 230,0	76,0	599,8
							111	1,482	465,6	2 692,8	2 227,3	77,0	604,6
65	0,250	272,0	2 618,4	2 346,3	40,6	352,9	112	1,532	469,8	2 694,3	2 224,5	78,1	609,4
66	0,262	276,2	2 620,1	2 343,9	41,2	359,2	113	1,583	474,0	2 695,8	2 221,8	79,1	614,2

Fuente: BALOH, Tone y WITTEWER, Enrique. *Manual de energía para fábricas de azúcar*. p. 37.

Anexo 4. **Espesores de pared de tubos de cobre BWG**

Gauge	Birmingham Wire Gage B.W.G. (inches)
00000 (5/0)	0.500
0000 (4/0)	0.454
000 (3/0)	0.425
00 (2/0)	0.380
0	0.340
1	0.300
2	0.284
3	0.259
4	0.238
5	0.220
6	0.203
7	0.180
8	0.165
9	0.148
10	0.134
11	0.120
12	0.109
13	0.095
14	0.083
15	0.072
16	0.065

Fuente: *Espesores de tubo de pared de tubos de cobre BWG*. http://www.engineeringtoolbox.com/BWG-wire-gage-d_508.html. Consulta: junio de 2015.

Anexo 5. **Fabricación de un intercambiador de calor de carcasa y tubos**

FABRICACION DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR DE CARCAZA Y TUBOS		
No.	Actividades a realizar	PERSONAL
1	Cortar, rolar y unir lámina p/cuerpo del intercambiador	S1 y A
2	Armar cuerpo del intercambiador	S1 y A
3	Cortar y rolar 2 anillos para extremos del intercambiador	S1 y A
4	Trazar, cortar y soldar flanges a los anillos extremos del intercambiador	S1 y A
5	Barrenar agujeros de flanges de anillos extremos y refrentar	M1 y A
6	Cortar y trazar 2 espejos y 6 baffles de soporte de tubos	S2 y A
7	Barrenar 2 espejos y 6 baffles soporte	M1, M2 y A
8	Cortar y soldar mamparas a espejos	S2 y A
9	Trazar y cortar tapas con sus refuerzos	S2 y A
10	Trazar, cortar y soldar flanges a las tapas	S2 y A
11	Barrenar agujeros de flanges de tapas y refrentar	M1
12	Montar y alinear espejos con mamparas y baffles soporte a cuerpo de calentadores	S3
13	Entubar y expandar calandria de calentadores	M1 Y M2 Y AYUD
14	Unir tapas con anillos extremos	S3
15	Hacer prueba hidrostática del cuerpo	M1 y A
16	Hacer prueba hidrostática de la calandria	M1 y A
17	Cerrar tapas	M1, M2 y A
18	Instalación general de válvulas y tuberías	S1, S2, S3 y A
<p>S = Soldador M = Mecánico A = Ayudante</p>		

Fuente: información proporcionada por el Ingenio Tululá.

