



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

DISEÑO, MONTAJE Y EVALUACIÓN TÉCNICO FINANCIERA DE UN INTERCAMBIADOR DE PLACAS, EN EL ENFRIAMIENTO DE CONDENSADOS PARA SUSTITUIR AGUA DE RÍO, EN LOS CLARIFICADORES DE JUGO DE LA EMPRESA PANTALEÓN, S. A.

Luis Ernesto Aragón Ruckwardt

Asesorado por el Ing. Pablo Fabián Escobar Grajeda

Guatemala, marzo de 2016

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

DISEÑO, MONTAJE Y EVALUACIÓN TÉCNICO FINANCIERA DE UN INTERCAMBIADOR DE PLACAS, EN EL ENFRIAMIENTO DE CONDENSADOS PARA SUSTITUIR AGUA DE RÍO, EN LOS CLARIFICADORES DE JUGO DE LA EMPRESA PANTALEÓN, S. A.

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

LUIS ERNESTO ARAGÓN RUCKWARDT

ASESORADO POR EL ING. PABLO FABIÁN ESCOBAR GRAJEDA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO

GUATEMALA, MARZO 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. Alfredo Enrique Beber Aceituno (a.i.)
EXAMINADOR	Ing. Otto Raúl de León de Paz
EXAMINADORA	Inga. Lorena Victoria Pineda Cabrera
EXAMINADOR	Ing. Gerardo Ordóñez
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

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, MONTAJE Y EVALUACIÓN TÉCNICO FINANCIERA DE UN INTERCAMBIADOR DE PLACAS, EN EL ENFRIAMIENTO DE CONDENSADOS PARA SUSTITUIR AGUA DE RÍO, EN LOS CLARIFICADORES DE JUGO DE LA EMPRESA PANTALEÓN, S. A.

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha 11 de noviembre de 2013.

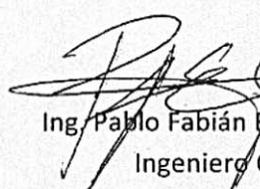


Luis Ernesto Aragón Ruckwardt

Guatemala 10 de septiembre de 2014

Ing. Victor Manuel Monzón
Director de Escuela de Ingeniería Química
Ingeniero Químico

Deseándole un buen día en sus labores cotidianos. Por medio de la presente quiero dar por autorizado y revisado el informe final de EPS del alumno Luis Ernesto Aragón Ruckwardt, de carnet 200914982. El tema del informe es *"DISEÑO, MONTAJE Y EVALUACIÓN TÉCNICO FINANCIERA DE UN INTERCAMBIADOR DE PLACAS, EN EL ENFRIAMIENTO DE CONDENSADOS PARA SUSTITUIR AGUA DE RÍO, EN LOS CLARIFICADORES DE JUGO DE LA EMPRESA PANTALEON S. A."* Cualquier duda favor de comunicarse conmigo.


Ing. Pablo Fabián Escobar Grajeda
Ingeniero Químico
Colegiado 1339

Pablo Fabián Escobar (?)
INGENIERO QUÍMICO
COLEGIADO 1339



Guatemala, 07 de mayo de 2015.
Ref.EPS.DOC.351.05.15.

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

Ing. Rodríguez Serrano:

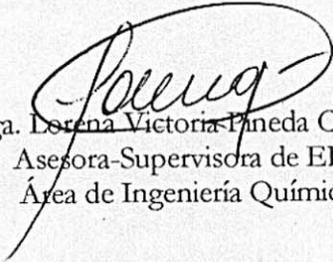
Por este medio atentamente le informo que como Asesora-Supervisora de la Práctica del Ejercicio Profesional Supervisado (E.P.S.), del estudiante universitario **Luis Ernesto Aragón Ruckwardt** de la Carrera de Ingeniería Química, con carné No. **200914982**, procedí a revisar el informe final, cuyo título es **“DISEÑO, MONTAJE Y EVALUACIÓN TÉCNICO FINANCIERA DE UN INTERCAMBIADOR DE PLACAS, EN EL ENFRIAMIENTO DE CONDENSADOS PARA SUSTITUIR AGUA DE RÍO, EN LOS CLARIFICADORES DE JUGO DE LA EMPRESA PANTALEÓN S. A.”**.

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”


Inga. Lorena Victoria Pineda Cabrera
Asesora-Supervisora de EPS
Área de Ingeniería Química



c.c. Archivo
LVPC/ra



Guatemala, 07 de mayo de 2015.
Ref.EPS.D.210.05.15.

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, MONTAJE Y EVALUACIÓN TÉCNICO FINANCIERA DE UN INTERCAMBIADOR DE PLACAS, EN EL ENFRIAMIENTO DE CONDENSADOS PARA SUSTITUIR AGUA DE RÍO, EN LOS CLARIFICADORES DE JUGO DE LA EMPRESA PANTALEÓN S. A."** que fue desarrollado por el estudiante universitario Luis Ernesto Aragón Ruckwardt, quien fue debidamente asesorado y supervisado por la Ingeniera Lorena Victoria Pineda Cabrera.

Por lo que habiendo cumplido con los objetivos y requisitos de ley del referido trabajo y existiendo la aprobación del mismo por parte de la Asesora-Supervisora 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 Asesora de EPS



SJRS/ra



Guatemala, 21 de enero de 2016.
Ref. EIQ.TG-IF.004.2016.

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 EIQ-PRO-REG-007 correlativo **149-2013** 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, EPS-**

Solicitado por el estudiante universitario: **Luis Ernesto Aragón Ruckwardt**.
Identificado con número de carné: **2009-14982**.
Previo a optar al título de **INGENIERO QUÍMICO**.

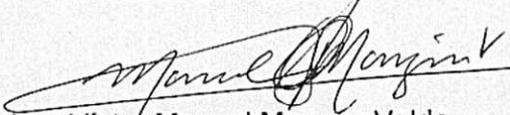
Siguiendo los procedimientos de revisión interna de la Escuela de Ingeniería Química, los Miembros de la Terna han procedido a **APROBARLO** con el siguiente título:

**DISEÑO, MONTAJE Y EVALUACIÓN TÉCNICO FINANCIERA DE UN
INTERCAMBIADOR DE PLACAS, EN EL ENFRIAMIENTO DE CONDENSADOS PARA
SUSTITUIR AGUA DE RÍO, EN LOS CLARIFICADORES DE JUGO DE LA EMPRESA
PANTALEÓN S.A.**

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por el Ingeniero Químico: **Pablo Fabián Escobar Grajeda**.

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. Víctor Manuel Monzón Valdez
COORDINADOR DE TERNA
Tribunal de Revisión
Trabajo de Graduación



C.c.: archivo





Ref.EIQ.TG.014.2016

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 **LUIS ERNESTO ARAGÓN RUCKWARDT** titulado: **"DISEÑO, MONTAJE Y EVALUACIÓN TÉCNICO FINANCIERA DE UN INTERCAMBIADOR DE PLACAS, EN EL ENFRIAMIENTO DE CONDENSADOS PARA SUSTITUIR AGUA DE RÍO, EN LOS CLARIFICADORES DE JUGO DE LA EMPRESA PANTALEÓN, S.A."** 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, marzo de 2016

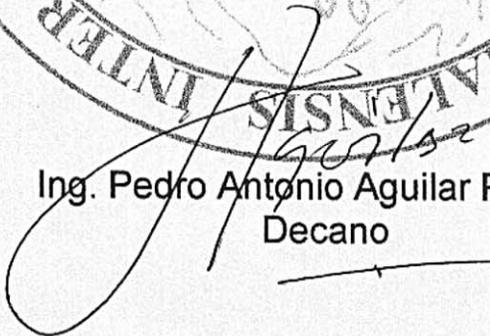
Cc: Archivo
CSWD/ale

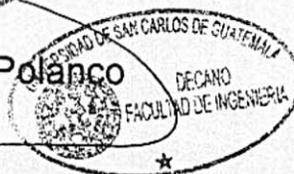




El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al trabajo de graduación titulado: **DISEÑO, MONTAJE Y EVALUACIÓN TÉCNICO FINANCIERA DE UN INTERCAMBIADOR DE PLACAS, EN EL ENFRIAMIENTO DE CONDENSADOS PARA SUSTITUIR AGUA DE RÍO, EN LOS CLARIFICADORES DE JUGO DE LA EMPRESA PANTALEÓN, S.A.**, presentado por el estudiante universitario **Luis Ernesto Aragón Ruckwardt**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.


Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Decano



Guatemala, marzo 2016

/cc

ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Por darme las herramientas y privilegios que me permitieron terminar la carrera.
- Mis padres** Fausto Aragón y Lucy Ruckwardt, quienes siempre fueron, son y serán ejemplos de esfuerzo y trabajo.
- Mi esposa** Keydel de Aragón, por su constante apoyo durante el tiempo que llevamos juntos.
- Mi hija** Carmen Lucía Aragón Orellana, por ser fuente de motivación y cambio en mi vida.
- Mi abuelo** Franz Ruckwardt, por su presencia y ejemplo durante su estadía en este mundo.

AGRADECIMIENTOS A:

**Universidad de San
Carlos de Guatemala**

Por darme la oportunidad de estudio.

**Facultad de Ingeniería
Química**

Por darme las herramientas necesarias para ejercer la ingeniería química.

Mis amigos

Diego Rendón, Alberto Rodríguez, Byron Roldán, Bryan Carrera, Sergio Barahona, Alejandra Peláez, Brenda Monterroso, Nancy Castro, Lourdes Castillo, Rocío Lira, Andrés Puac, Carol Corzo y Héctor Méndez, por ser actores principales durante la carrera universitaria.

Mi prima

Susana Alvarez, por su apoyo incondicional.

Mi asesor

Pablo Escobar, por su influencia en mi crecimiento profesional como ingeniero químico.

Mi compañero

José Labin por ser una importante influencia en mi carrera.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
RESUMEN.....	XI
OBJETIVOS.....	XIII
Hipótesis.....	XIV
INTRODUCCIÓN	XV
1. ANTECEDENTES	1
2. MARCO TEÓRICO.....	3
2.1. Descripción del proceso de clarificación de jugo	3
2.2. Clarificadores de jugo	3
2.2.1. Jugo claro	3
2.3. Floculantes	4
2.3.1. Características de un floculante aniónico	4
2.3.2. Fisicoquímica de la formación de los flóculos en jugo de caña	5
2.3.3. Preparación del floculante	6
2.3.4. Concentración iónica del agua de preparación de floculante	6
2.3.5. Condiciones de pH del agua de preparación de floculante	6
2.4. Transmitancia	7
2.5. Icumsa	7

2.6.	Intercambiadores de calor.....	7
2.6.1.	Coeficiente global de transferencia de calor.....	9
2.7.	Balance de energía total	9
3.	DISEÑO METODOLÓGICO.....	13
3.1.	Variables	13
3.2.	Delimitación del campo de estudio.....	14
3.3.	Recursos humanos disponibles	14
3.4.	Recursos materiales disponibles (equipo, cristalería, reactivos).....	14
3.4.1.	Recursos físicos disponibles	15
3.4.2.	Materia prima	15
3.4.3.	Equipo	15
3.4.4.	Equipo auxiliar.....	15
3.4.5.	Infraestructura	15
3.5.	Técnica cualitativa o cuantitativa.....	16
3.6.	Recolección y ordenamiento de la información.....	16
3.6.1.	Inspección del proceso de clarificación	16
3.6.2.	Preparación de floculante utilizando agua de condensados	17
3.6.3.	Determinación del impacto financiero	17
3.7.	Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información.....	18
3.8.	Análisis estadístico.....	25
3.8.1.	Número de repeticiones	26
3.8.2.	Media aritmética	27
3.8.3.	Desviación estándar	27
4.	RESULTADOS.....	29

5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	35
6.	LOGROS OBTENIDOS.....	37
	CONCLUSIONES	39
	RECOMENDACIONES.....	41
	BIBLIOGRAFÍA.....	43
	APÉNDICES	47
	ANEXOS.....	45

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Entrelazamiento de los coágulos de impureza con la cadena del floculante a través del puente iónico del calcio	5
2.	Diagrama de las trayectorias de flujo en un intercambiador de placas	8
3.	Aspectos energéticos de un sistema de tuberías	10
4.	Diagrama de flujo del intercambiador de placas y sus componentes...	30
5.	Resultados obtenidos en la calidad del jugo al variar la preparación de floculante con agua condensada.....	31
6.	Comparación de la calidad del jugo durante 60 días, expresado en semanas de las zafas 2012-2013 y 2013-2014	32
7.	Comparación de los kilogramos de toneladas de caña durante 60 días, expresado en semanas de las zafas 2012-2013 y 2013- 2014 ..	33

TABLAS

I.	Tabla de variables en el trabajo EPS	13
II.	Características fisicoquímicas del agua de río	18
III.	Características fisicoquímicas del agua condensada de la evaporación.....	19
IV.	Variables independientes del sistema de enfriamiento en el intercambiador de placas	19
V.	Variables en el intercambiador de placas.....	20

VI.	Transmitancia en la estación de clarificadores de jugo durante 60 días del período a evaluar de la zafra 2012-2013.....	20
VII.	Transmitancia en la estación de clarificadores de jugo durante 60 días del período a evaluar de la zafra 2013-2014.....	21
VIII.	Tasa de molienda diaria durante 60 días del período a evaluar de la zafra 2012-2013.....	22
IX.	Tasa de molienda diaria durante 60 días del período a evaluar de la zafra 2013-2014.....	23
X.	Consumo de floculante, en el jugo claro durante 60 días del período a evaluar en la zafra 2012-2013	24
XI.	Consumo de floculante, en el jugo claro durante 60 días del período a evaluar en la zafra 2013-2014	25
XII.	Promedio aritmético de los valores obtenidos en cuanto a la caracterización fisicoquímica del tipo de agua a utilizar	29
XIII.	Parámetros de diseño del intercambiador de placas	29
XIV.	Ahorro en dólares por reducción del consumo de floculante por tonelada de caña, al comparar zafras 2012-2013 con 2013-2014.....	33
XV.	Ahorro en dólares por reducción del consumo de floculante por tonelada de caña, al comparar zafras 2012-2013 con 2013-2014.....	34
XVI.	Análisis de grados de libertad.....	47
XVII.	Requisitos académicos	45

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
A_s	Área superficial de contacto de transferencia
Q	Calor calorífico, transferido en el intercambiador
cm	Centésima parte de un metro
U_t	Coeficiente de transferencia total del intercambiador de calor.
gc	Constante de relación de gravedad
ρ	Densidad, cantidad de materia en determinado volumen.
U	Energía interna en el fluido
H_1	Hipótesis alternativa
H_o	Hipótesis nula
h	Hora
in	<i>Inches</i> , longitud en pulgadas
Ca^{+2}	Ion calcio
Btu	Medida de energía
J	Medida de energía, Joules
$^{\circ}F$	Medida de temperatura, grados Fahrenheit
$^{\circ}C$	Medida de temperatura, grados Celsius
m	Metro
μS	Microsiemens, medida de conductividad
kg	Mil gramos, medida de masa
$kmol$	Mil moles, referencia a cantidad e materia

ppm	Partes por millón, medida de concentración
ft.²	Pie cuadrado, medida de área
p	Presión de del fluido
rpm	Revoluciones por minuto
ΔT_{LM}	Temperatura logarítmica media
Ws	Trabajo de bomba suministrado
u. placa	Unidades de placas del intercambiador de calor
m³	Volumen expresado en metros cúbicos

GLOSARIO

Cachaza	Lodo retirado del jugo alcalizado, gracias a la acción del floculante, y formado por sólidos insolubles, principalmente fosfatos de calcio.
Capacidad calorífica	Energía necesaria para aumentar la temperatura de una determinada sustancia en una unidad de temperatura.
Clarificador	Equipo de separación sólido-líquido utilizado en ingenios azucareros para la remoción de sólidos insolubles en jugo, meladura y licor. La remoción puede ser por flotación o sedimentación.
Coefficiente de transferencia de calor	Coefficiente que relaciona la transferencia de calor, con la temperatura, área, tiempo y energía en un equipo de intercambio de calor.
Dureza del agua	Parámetro del agua que define la cantidad de magnesio y calcio, en partes por millón.
Floculante	Sustancia química usualmente de características poliméricas que aglutina sólidos en suspensión, como coagulantes, sales y más.

Flóculo	Cuando varios coágulos se pueden unir a una molécula de polímero hasta constituir una extensa red denominada floculo.
Jugo alcalizado	Jugo extraído de la caña de azúcar que es alcalizado mediante la adición de sacarato de cal.
Jugo claro	Jugo obtenido de la clarificación de jugo alcalizado, mediante la remoción de los sólidos insolubles, en equipos denominados clarificadores.
Operador de jugo	En el proceso de la producción de azúcar, persona encargada de la preparación de floculante, controlar la calidad de los jugos, administrar la cal en el sacarato de cal y de realizar las limpiezas, ya sea química o mecánica, a los calentadores de jugo.
Sacarato de cal	Mezcla de lechada de cal, jugo claro y meladura, de la cual se obtiene una solución de iones sacarato y calcio.
Transmitancia	Relación entre el poder de radiación transmitido por una muestra y el poder de radiación que incide de la muestra.

RESUMEN

En la planta de Pantaleón, S. A., dentro del proceso de tratamiento de jugo, se reemplazó el agua de río por agua condensada del proceso de evaporación para la preparación de floculante, junto con ello se determinó su impacto financiero. Se encontró que el agua condensada presenta mejores características fisicoquímicas para la preparación del floculante que se utiliza en la clarificación de jugo.

El proyecto consistió en el montaje y evaluación de un intercambiador de placas. Para el montaje del equipo se diseñó el sistema de tuberías y accesorios a partir de mediciones, flujos, temperaturas de operación y ubicación del equipo. Luego, se evaluó su impacto en el proceso de clarificación de jugo, mediante un control en el consumo de productos químicos utilizados.

Se inició el proyecto caracterizando el agua a usar en la preparación de floculante, seguido de la elaboración de un diseño del sistema de tubería, con el fin de poder identificar los accesorios a conseguir. La mejora en la calidad del jugo se observó por medio de la transmitancia y el impacto financiero a través del consumo de floculante. Ambos resultados se compararon utilizando los datos registrados de la zafra 2012 y 2013.

Se encontró que el agua condensada presenta menor cantidad de sílice, dureza y conductividad, pero mayor temperatura que el agua de río. También, se determinó que, durante los 60 días de observación utilizando agua condensada en la zafra 2013, la transmitancia en el jugo fue menor que la zafra 2012.

OBJETIVOS

General

Diseñar y montar un intercambiador de placas como enfriador de agua condensada y evaluar su funcionalidad técnico financiera a través del consumo de floculante y la variación de la transmitancia de jugo claro.

Específicos

1. Encontrar variables que puedan afectar al rendimiento de floculante, mediante una caracterización fisicoquímica al agua condensada y al agua de río.
2. Encontrar las variables necesarias que permiten hacer un diseño del sistema de tubería del intercambiador y determinar las cargas hidráulicas totales.
3. Elaborar un diagrama de flujo basado en el montaje del intercambiador y sus componentes.
4. Verificar el efecto obtenido en la clarificación de jugo al modificar las variables del uso de floculante y agua de preparación del mismo.
5. Determinar el impacto financiero mediante un análisis comparativo en consumo de floculante y transmitancia de jugo entre periodos específicos de las zafras 2013 y 2014.

Hipótesis

Hipótesis científica

Se disminuyen los costos por consumo de floculante y mejora la calidad del jugo clarificado, mediante la instalación de un intercambiador de placas que pueda enfriar el agua de condensados en su uso en la preparación de floculante.

Hipótesis nula

H_0 = no existe una mejora significativa en la calidad del azúcar, costo de proceso y el consumo de un ayudante de floculación floculante al evaluar realizar un proyecto de mejora para la preparación de floculante que comprende: diseñar montar y montar un sistema de tubería y accesorios para el intercambiador de placas.

Hipótesis alternativa

H_1 = existe una mejora significativa en la calidad del azúcar, costo de proceso y el consumo de un ayudante de floculación floculante al realizar evaluar un proyecto de mejora para la preparación de floculante que comprende: diseñar y montar un sistema de tubería y accesorios para el intercambiador de placas.

INTRODUCCIÓN

Para lograr un aumento de la eficiencia industrial del ingenio, en las áreas de la fábrica se propusieron proyectos para mejorar la eficiencia y optimización, en busca de reducir los costos de operación para lograr una mayor diferencia con el precio de venta del azúcar; el cual se determina por el mercado internacional y no por los costos de producción de la empresa.

El área de tratamiento de jugo cuenta con dos tipos de agua provenientes de vapor condensado de la evaporación y agua de río. Con base en lo mencionado, se ha decidido decidió utilizar agua condensada, en lugar de agua de río para la preparación de floculante, que debe mejorar la floculación y la calidad del jugo claro. Para lograrlo, se modificó la temperatura del agua condensada y se transportó hacia el tanque de preparación, en ayuda de la sedimentación de cachaza en los clarificadores.

En la zafra 2012-2013, la preparación de floculante se realizaba únicamente con agua de río, pero el agua a utilizar debe ser de calidad. El agua de río no se define como agua de calidad.

En función de lo anterior se contempló realizar un proyecto en mejora de la infraestructura y operación, de la preparación de floculante. El proyecto inició desde el montaje de un intercambiador de calor de placas, con el objetivo de enfriar el agua condensada con agua de río para mejorar la calidad del jugo de los operadores, reducir costos de operación y mejorar el aprovechamiento de los recursos de la fábrica.

La evaluación del proyecto se realizó comparando los efectos fisicoquímicos y financieros de las zafras 2012-2013 y 2013-2014.

1. ANTECEDENTES

La búsqueda de procesos óptimos y eficientes en los ingenios de azúcar se debe al precio de oferta que tiene internacionalmente en el mercado, el cual está sujeto a las fluctuaciones de oferta y demanda. Por lo tanto, en los ingenios es primordial la reducción de costos, mediante la optimización de recursos, como el aprovechamiento de energía, insumos, subproductos y más.

El Ingenio Pantaleón utilizaba agua de río para la preparación de floculante, que es usado en la sedimentación dentro de los clarificadores. Debido a que está posee impurezas, sedimentos y más, según especificaciones técnicas de los floculantes, su uso constante provoca un consumo mayor del mismo y también incide en la calidad del azúcar bajos rendimientos en la clarificación de jugo.

En el proceso de evaporación se genera una gran cantidad de agua condensada que posee mejor calidad para la preparación de floculante y se contempló la sustitución del agua de río por ella.

Debido a la alta temperatura del agua condensada es peligroso el trabajar con ella. Las especificaciones técnicas de los usos de polímero para floculación exigen que se utilice agua de calidad a temperaturas menores de 45 °C. También, la temperatura puede actuar como una perturbación externa al ser utilizada para la preparación de floculante y también puede debilitar las cadenas del polímero.

Para la solución del problema, el área de tratamiento de jugo tenía un intercambiador de placas a disposición, que es el equipo principal del presente trabajo.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Descripción del proceso de clarificación de jugo

La clarificación de jugo es el proceso por el cual son removidas las impurezas (bien sean solubles, coloidales en suspensión o insolubles, que implican el asentamiento y remoción por decantación de las mismas para producir un jugo claro.

Una de las formas de clarificar jugos es mediante el uso de polímeros ayudantes en la floculación de impurezas, los cuales se encargan de atrapar el material en suspensión disminuyendo los tiempos de sedimentación y produce un jugo claro de calidad.

2.2. Clarificadores de jugo

Son equipos industriales en donde se realiza la clarificación del jugo alcalizado. Generalmente funcionan por sedimentación de las partículas insolubles, se utilizan floculantes que reducen los tiempos de residencia en los clarificadores y mejoran la calidad del jugo.

2.2.1. Jugo claro

Es el flujo proveniente de los clarificadores al cual se le ha removido impurezas y sedimentos. Debe cumplir con parámetros fisicoquímicos para considerarse de buena calidad, como transmitancia, color y turbiedad.

2.3. Floculantes

Los floculantes, también llamados ayudantes de coagulación, de floculación o de filtración, son sustancias poliméricas de elevado peso molecular (1×10^6 kg/kmol), solubles en agua, que se clasifican por su naturaleza, su origen (natural o sintético) o según su carga iónica (no iónico, catiónico, aniónico) y se encuentran en presentaciones líquidas o sólidas.

Para la clarificación de jugo, las industrias azucareras utilizan floculantes sintéticos aniónicos sólidos, los cuales poseen una gran afinidad a las superficies sólidas.

Hasta el momento, investigaciones realizadas han comprobado que no existe un polímero que se desempeñe igual en todas las industrias azucareras. Esto indica que cada fábrica deberá hacer la selección del producto que aplicará a su proceso, según sean sus condiciones de operación.

2.3.1. Características de un floculante aniónico

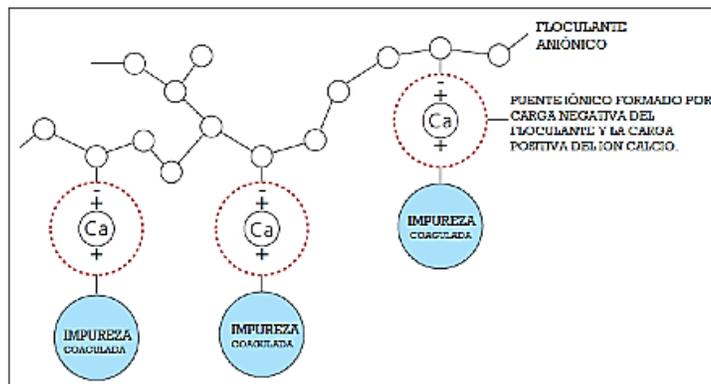
Los componentes principales de este grupo de polímeros son las poli(acrilamidas). Sin embargo, para que obtengan cargas negativas, varios radicales amida son sustituidos parcialmente por radicales aniónicos, generalmente por enlaces $-\text{COOH}$ o $-\text{COONa}$ de forma repetitiva hasta constituir el polímero deseado.

2.3.2. Fisicoquímica de la formación de los flóculos en jugo de caña

Es importante recordar que durante la floculación existe una serie de compuestos con carga iónica. Se encuentra, por ejemplo, el fosfato tricálcico precipitado anteriormente en el proceso de coagulación, el cual posee una carga positiva por la presencia del ion calcio.

El ion calcio (Ca^{+2}) es el encargado de realizar la unión entre la impureza coagulada y el floculante en solución en una sola molécula de floculante. Los grupos acrilato se disocian y sus cargas negativas se activan en la cadena del polímero, esto quiere decir que varios coágulos se pueden unir a una molécula de polímero hasta constituir una extensa red denominada flóculo, facilitando una rápida sedimentación y, por ende, una producción de jugo más claro en menor tiempo.

Figura 1. **Entrelazamiento de los coágulos de impureza con la cadena del floculante a través del puente iónico del calcio**



Fuente: REIN, P. *Ingeniería de la caña de azúcar*. p. 253.

2.3.3. Preparación del floculante

Los floculantes sólidos deben ser aplicados al proceso de clarificación de jugo en forma de disolución, la cual debe ser preparada bajo condiciones controladas para obtener rendimientos admisibles, esperados por la industria y por el proveedor.

2.3.4. Concentración iónica del agua de preparación de floculante

El agua empleada debe ser limpia y de baja dureza. Un ensayo sencillo para demostrar esto es preparar floculante con dos tipos de agua de concentración iónica conocida: alta, y baja, evaluando su impacto en la clarificación del jugo.

2.3.5. Condiciones de pH del agua de preparación de floculante

Considerando que la mayor eficiencia de los floculantes aniónicos se obtiene cuando el rango de pH va de la zona neutra a la alcalina (como consecuencia de una mayor disociación de los iones COO^- de su estructura, en un medio donde existan iones OH^-), es importante ajustar el pH del agua de preparación del floculante hasta la zona mencionada.

La mayoría de las veces, el responsable del proceso es quien determina los valores exactos de pH del agua tras hacer varios ensayos a nivel industrial o de laboratorio. A su vez, existen valores aproximados de pH que aplican para cualquier industria y cualquier floculante aniónico.

2.4. Transmitancia

Es la relación porcentual entre la cantidad luz a una longitud de onda específica que atraviesa un cuerpo y la cantidad de luz que viene de este, ambos medidos en la misma posición del espectro y atravesando un área específica. Esta se verá afectada por coloides en suspensión que puedan existir en la muestra. En el ingenio la, transmitancia objetivo en jugo claro es de 20 unidades Icumsa.

2.5. Icumsa

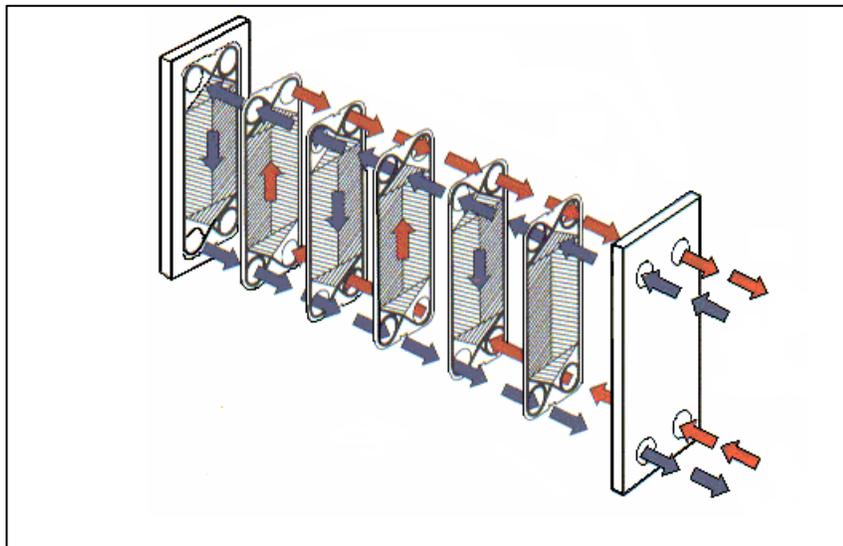
Es el Comité Internacional de Métodos Uniformes para Análisis de Azúcar. Es la única organización internacional dedicada a los métodos de análisis de azúcar. Los métodos de Icumsa están reconocidos por autoridades como *The Codex Alimentarium Commission*, el OML, y *US Food Chemicals Codex*.

2.6. Intercambiadores de calor

El papel de los intercambiadores de calor ha adquirido una gran importancia ante la necesidad de ahorrar energía y disponer de equipos óptimos, no solo en función de su análisis térmico y el rendimiento económico del montaje, sino también en función de otros factores, como el aprovechamiento energético del sistema, la cantidad de energía y de materias primas necesarias para cumplir una determinada función. Desde el momento que un intercambiador de calor se instala y se pone en funcionamiento dentro de un proceso de transferencia térmica, se necesita un determinado gradiente de temperatura para que se pueda lograr la transferencia de calor.

En un intercambiador de placas, las corrientes de los fluidos son separadas por las placas que pueden ser lisas o corrugadas, las cuales son usadas para la transferencia del calor, como se ilustra en la figura 2.

Figura 2. **Diagrama de las trayectorias de flujo en un intercambiador de placas**



Fuente: PERRY, J. *Manual del ingeniero químico*. Sección 11-53.

El análisis térmico se realiza con el objetivo de expresar la cantidad total de calor transferido del fluido caliente al fluido frío, en términos del coeficiente global de transferencia de calor, temperaturas de entrada o salida y la superficie de transferencia de calor.

2.6.1. Coeficiente global de transferencia de calor

Un parámetro muy importante en cualquier análisis térmico de intercambiadores es el coeficiente global de transferencia de calor, el cual se puede definir en términos de una resistencia térmica total para la transferencia de calor de un fluido a otro, ya sea a través de una placa o de la pared de un tubo, siendo este último el caso predominante. En el caso de los intercambiadores de calor estos traen un coeficiente de transferencia dentro de sus especificaciones técnicas, el cual se puede utilizar en la determinación de la eficiencia de la transferencia.

Para los intercambiadores, tomando como base un circuito térmico, el coeficiente global de transferencia de calor se obtiene a partir de la ecuación:

$$Q = U_t * A_s * \Delta T_{LM} \quad [\text{Ec. 1}]$$

Donde Q representa, en Joules (J), el calor transferido, A_s el área superficial de contacto y ΔT_{LM} la temperatura logarítmica media. Cuando un intercambiador de calor ha estado en operación durante un periodo largo, a menudo las superficies quedan sujetas a la obstrucción debido a impurezas entre el fluido y el material de la pared, afectando de esta manera la transferencia de calor.

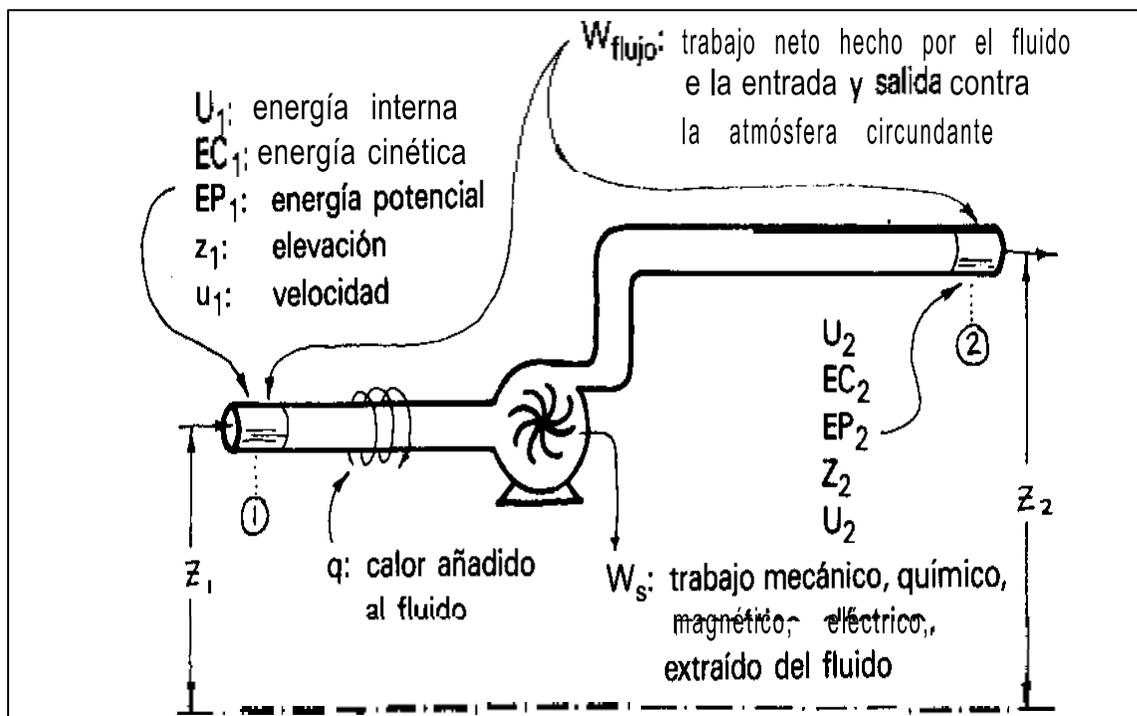
2.7. Balance de energía total

Levenspiel (1993) menciona: “Considérense las interacciones energéticas a medida que una corriente de materia fluye en régimen estacionario entre los puntos 1 y 2 de un sistema de tuberías, como se muestra en la figura 3 partir de

la primera ley de la termodinámica se tiene por cada unidad de masa de fluido circulante” (p. 3).

$$\Delta U + \Delta \left(\frac{gz}{g_c} \right) + \Delta \left(\frac{u^2}{2g_c} \right) + \Delta \left(\frac{p}{\rho} \right) = q - W_s \quad [\text{Ec. 2}]$$

Figura 3. Aspectos energéticos de un sistema de tuberías



Fuente: LEVENSPIEL, O. *Flujo de fluidos e intercambio de calor*. p. 3.

Donde

ΔU = energía interna, en Joules

g = constante de aceleración de la gravedad, en metros por segundo

z = altura del fluido, en metro

u = energía cinética, en Joule

p = presión del fluido, en Pascales

ρ = densidad del fluido

q = calor suministrado al fluido desde el entorno, en Joules

W_s = trabajo suministrado al fluido desde el entorno

Levenspiel (1993) afirma: “Esta es la primera ley de la termodinámica en su forma usual y útil para sistemas de corriente única en régimen estacionario” (p. 4).

Levenspiel (1993) concluye: “El balance de energía mecánica, es el punto de partida para estimar los efectos mecánicos en el flujo de fluidos, pérdida de presión, potencia de bombeo, velocidades límites, entre otros.” (p. 6).

3. DISEÑO METODOLÓGICO

3.1. Variables

A continuación se presentan las variables a estudiar en el presente trabajo de graduación.

Tabla I. **Tabla de variables en el trabajo EPS**

Variable	Dimensional	Dependiente	Independiente	Constante	No constante
Toneladas de caña molidas por día	<i>ton/d</i>		X		X
Consumo de floculante por día	<i>kg floculante/d</i>		X		X
Consumo de floculante por tonelada de caña molida	<i>kg floculante/ton</i>	X			X
Transmitancia en el jugo clarificado	Unidades Icumsa a 900 nm	X			X
Temperatura del agua condensada	°F		X	X	
Temperatura del agua de río	°F		X	X	
Temperatura en el agua de preparación de floculante	°F	X		X	

Fuente: elaboración propia.

3.2. Delimitación del campo de estudio

- Campo: diseño, instalación y evaluación técnico financiera.
- Área: preparación de floculante, clarificación de jugo, tratamiento de jugo.
- Línea: condensados del efecto 3, 4, y 5 de evaporadores.
- Proyecto: *Diseño, montaje y evaluación técnico financiera de un intercambiador de placas, en el enfriamiento de condensados para sustituir agua de río, en los clarificadores de jugo de la empresa Pantaleón, S. A.*
- Ubicación: la parte experimental de la investigación se llevó a cabo en el área de Tratamiento de Jugo de Pantaleón, S. A., ubicada en el km 86,5 Santa Lucía Cotzumalguapa, Escuintla.

3.3. Recursos humanos disponibles

Investigador: Luis Ernesto Aragón Ruckwardt

Asesora: Inga. Lorena Pineda

Asesor: Ing. Pablo Fabián Escobar

3.4. Recursos materiales disponibles (equipo, cristalería, reactivos)

A continuación se presentan los recursos materiales a utilizar para la realización del trabajo de graduación.

3.4.1. Recursos físicos disponibles

La parte experimental de la investigación se llevó a cabo en la planta de producción de azúcar, dentro del área de Tratamiento de Jugo, ubicada en el km 86,5 Santa Lucía Cotzumalguapa, Escuintla.

3.4.2. Materia prima

- Agua condensada
- Agua de río
- Floculante: polímero acrilamida
- Jugo alcalizado
- Jugo claro

3.4.3. Equipo

- Intercambiador de placas
- Válvula de mariposa
- Válvula de compuerta
- Bomba centrífuga Goulds
- Tanque de imbibición (tanque de agua condensada)

3.4.4. Equipo auxiliar

Sistema de registro de ensayos del laboratorio propio del ingenio.

3.4.5. Infraestructura

- Base de concreto intercambiador de placas 2,5 m x 1,5 m.

- Área de terreno tanque de agua 3 m x 3 m.
- Base de concreto bomba Goulds 0,9 m x 1,6 m.
- Base de concreto para el tanque de almacenamiento de agua enfriada 4 m x 4 m.

3.5. Técnica cualitativa o cuantitativa

Para determinar la viabilidad del uso de agua condensada en la preparación de floculante se realizaron análisis de dureza, sílice, conductividad y pH para el agua de río y agua condensada.

A su vez, se elaboraron curvas características comparando la efectividad del floculante, mediante el consumo de floculante en función de la caña molida, como la transmitancia que se obtuvo durante un período específico de las zafras 2013 y 2014.

3.6. Recolección y ordenamiento de la información

Para obtener y presentar la información se siguieron ciertos pasos, los cuales se presentan a continuación.

3.6.1. Inspección del proceso de clarificación

- Inspeccionar que la temperatura de jugo alcalizado se encuentre dentro del rango establecido de 215 a 223 °F.
- Inspeccionar que el pH del jugo alcalizado se encuentre de 7,1 a 7,5.
- Inspeccionar que la disminución de pH de jugo alcalizado a claro sea de aproximadamente 0,4.

- Inspeccionar que el nivel de cachaza dentro del clarificador sea de aproximadamente 25 %.

3.6.2. Preparación de floculante utilizando agua de condensados

- Accionar la bomba de agua de río en el sistema.
- Abrir la válvula de succión de la bomba de agua condensada.
- Accionar la bomba de agua condensada desde el tanque de almacenamiento de agua fría hacia el tanque de preparación de floculante.
- Llenar el tanque de preparación de floculante con agua de condensados hasta un 60 % del tanque de preparación.
- Adicionar el floculante necesario a una dilución de 5 g/kg en el tanque, junto con el 40 % de agua faltante.
- Inspeccionar que la temperatura del agua de preparación de floculante sea menor a 45 °C.
- Inspeccionar que la agitación del tanque de floculante sea menor 2 rpm.
- Dejar al tanque de la solución de floculante madurar por un tiempo estimado de 2 a 3 horas.

3.6.3. Determinación del impacto financiero

La obtención de costos se realizó en función a una determinada porción de la zafra 2013-2014, y luego se comparó con una porción de la zafra 2012-2013 durante las mismas épocas.

- Encontrar el consumo de floculante durante el tiempo de evaluación en ambas zafras.

- Medir el costo total de la utilización de agua de río para la preparación de floculante.
- Medir el costo total de la utilización de agua de condensados para la preparación de floculante.
- Realizar una comparación beneficio/costo en cuanto al uso del agua de condensados y de río en la preparación de floculante.

3.7. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información

A continuación se presentan los datos obtenidos durante la elaboración del presente trabajo de graduación.

Tabla II. **Características fisicoquímicas del agua de río**

	Día	Conductividad (μS/cm)	Dureza del agua (ppm)	Sílice (ppm)	pH
Análisis fisicoquímico en agua de río	1	290	128	68,5	8,16
	2	297,3	122	300	8,43
	3	296,8	124	265	8,46
	4	301	122	157	7,46
	5	296,3	124	198	8,13
	6	288,3	118	215	8,21
	7	286,4	120	164	8,43
	8	297,6	127	223	8,08
	9	303,4	123	175	7,93
	10	297,3	125	193	7,5

Fuente: elaboración propia.

Tabla III. **Características fisicoquímicas del agua condensada de la evaporación**

	Día	Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Dureza del agua (ppm)	Sílice (ppb)	pH
Análisis fisicoquímico en agua condensada	1	93,1	24	5,2	7,02
	2	192	64	106	7,41
	3	99,2	14	30	7,16
	4	254,6	60	45	7,6
	5	159,7	41	47	7,30
	6	173,2	22	78	7,21
	7	156,8	44	38	7,13
	8	196,3	52	52	7,3
	9	203	19	41	7,08
	10	164,5	32	45	7,36

Fuente: elaboración propia.

Tabla IV. **Variables independientes del sistema de enfriamiento en el intercambiador de placas**

Variables en el sistema de enfriamiento de agua de imbibición		
	Fluido frío	Fluido caliente
	Agua de río	Agua de imbibición
Temperatura entrada ($^{\circ}\text{C}$)	23,00	62,00
Temperatura salida ($^{\circ}\text{C}$)	37,62	45,00
Diámetro de tubería (<i>in</i>)	6,00	6,00
Calor específico (C_p)	4,180,00	4,185,00
Densidad (kg/m^3)	997,00	983,30

Fuente: elaboración propia.

Tabla V. **Variables en el intercambiador de placas**

Área superficial/placa (ft. ² /u. placa)	11,00
Unidades de placas disponibles (u. placa)	75,00
Área superficial (ft ²)	825,00
Coefficiente de transferencia del intercambiador U teórico (Btu/h*pie ² *°F)	500,00

Fuente: elaboración propia.

Tabla VI. **Transmitancia en la estación de clarificadores de jugo durante 60 días del período a evaluar de la zafra 2012-2013**

Día de zafra	Transmitancia en el jugo claro (%)	Día de zafra	Transmitancia en el jugo claro (%)	Día de zafra	Transmitancia en el jugo claro (%)
1	34,01667	21	23,05	41	18,85
2	32,61667	22	18,9	42	15,03333
3	23,28333	23	26,91667	43	17,38333
4	32,23333	24	20,18333	44	16
5	31,36667	25	24,76667	45	22,7
6	35,65	26	17,76667	46	20,11667
7	31,66667	27	18,33333	47	19,13333
8	33,53333	28	22,38333	48	16,71667
9	33,16667	29	20,41667	49	19,03333
10	33,08333	30	24,26667	50	12,56667
11	30,95	31	15,58333	51	21,35
12	23,825	32	27,76667	52	11,98333
13	19,46667	33	32,5	53	13,23333
14	24,61667	34	25,43333	54	17,98333
15	24,35	35	27,28333	55	24,08333
16	31,91667	36	17,08333	56	30,21667
17	25,31667	37	15,46667	57	22,73333
18	29,11667	38	24,91667	58	21,8
19	25,07143	39	12,16667	59	28,65
20	27,18333	40	19,35	60	27,46667

Fuente: elaboración propia.

Tabla VII. Transmitancia en la estación de clarificadores de jugo durante 60 días del período a evaluar de la zafra 2013-2014

Día de zafra	Transmitancia en el jugo claro (%)	Día de zafra	Transmitancia en el jugo claro (%)	Día de Zafra	Transmitancia en el jugo claro (%)
1	15,66667	21	9,61667	41	21,28333
2	12,51667	22	15,65	42	20,4
3	11,08333	23	14,98333	43	17,98333
4	17,46667	24	15,41667	44	20,5
5	8,98333	25	16,95	45	23,35
6	11,1	26	17,8	46	24,46667
7	8,85	27	19,05	47	11,13333
8	9,21667	28	17,83333	48	13,75
9	9	29	11,31667	49	17,31667
10	10,01667	30	21,25	50	20,7
11	7,36667	31	16,25	51	21,73333
12	10,98333	32	10,55	52	14,28333
13	14,21667	33	11,41667	53	19,1
14	11,56667	34	15,23333	54	20,56667
15	14,88333	35	12,21667	55	14,08333
16	12,21667	36	15,98333	56	18,2
17	16,36667	37	9,4	57	11,81667
18	19,45	38	14,7	58	19,78333
19	18,55	39	18,1	59	16,9
20	14,35	40	20,65	60	16,75

Fuente: elaboración propia.

Tabla VIII. **Tasa de molienda diaria durante 60 días del período a evaluar de la zafra 2012-2013**

Día de zafra	Toneladas de caña molidas (ton/d)	Día de zafra	Toneladas de caña molidas (ton/d)	Día de zafra	Toneladas de caña molidas (ton/d)
1	26 870,43	21	26 508,64	41	20 208,04
2	24 814,77	22	20 849,89	42	24 308,35
3	22 346,2	23	23 315,57	43	25 655,95
4	24 578,97	24	26 041,43	44	27 041,82
5	25 754,24	25	25 829,46	45	26 004,36
6	26 847,57	26	25 207,05	46	26 499,18
7	26 475,14	27	23 450,57	47	24 552,54
8	24 704,97	28	26 425,11	48	24 136,25
9	26 507,73	29	24 266,73	49	24 789,75
10	27 589,79	30	26 260,44	50	21 887,55
11	27 555,85	31	20 463,8	51	22 279,95
12	26 309,22	32	23 306,12	52	24 128,54
13	23 108,77	33	25 610,3	53	26 527,16
14	24 420,04	34	23 862,54	54	25 392,32
15	26 018,39	35	27 243,41	55	25 713,66
16	26 943,83	36	25 044,87	56	23 557,9
17	25 521,09	37	25 550,67	57	26 005,46
18	27 838,3	38	26 488,39	58	22 790,24
19	26 474,64	39	26 960,05	59	24 582,19
20	25 581	40	24 754,56	60	24 225,53

Fuente: elaboración propia.

Tabla IX. **Tasa de molienda diaria durante 60 días del período a evaluar de la zafra 2013-2014**

Día de zafra	Toneladas de caña molidas (ton/d)	Día de zafra	Toneladas de caña molidas (ton/d)	Día de zafra	Toneladas de caña molidas (ton/d)
1	26 885,07	21	24 394,47	41	25 201,57
2	25 333,05	22	26 881,08	42	26 014,49
3	22 128,48	23	26 830,42	43	26 388,27
4	28 253,96	24	25 848,59	44	26 989,97
5	25 942,37	25	26 331,22	45	26 841,07
6	22 990,75	26	27 415,11	46	24 329,14
7	27 580,75	27	26 906,52	47	23 886,3
8	27 459,12	28	26 403,45	48	26 659,54
9	28 055,2	29	22 013,6	49	26 848,02
10	27 326,09	30	26 403,29	50	26 496,66
11	26 053,15	31	26 054,47	51	26 136,05
12	22 834,79	32	26 018,77	52	27 035,17
13	26 775,99	33	25 215,58	53	26 075,02
14	26 121,5	34	25 772,57	54	25 977,18
15	25 085,51	35	24 534,39	55	26 919,92
16	26 431,38	36	24 782,11	56	24 912,72
17	25 852,78	37	23 474,32	57	21 122,14
18	27 607,85	38	24 484,14	58	24 578,42
19	28 316,68	39	24 430,32	59	19 345,64
20	22 734,25	40	26 164,35	60	26 187,5

Fuente: elaboración propia.

Tabla X. **Consumo de floculante, en el jugo claro durante 60 días del período a evaluar en la zafra 2012-2013**

Día de zafra	Consumo de floculante (kg/d)	Día de zafra	Consumo de floculante (kg/d)	Día de zafra	Consumo de floculante (kg/d)
1	141,00	21	148,00	41	145,00
2	138,00	22	146,00	42	163,00
3	146,00	23	134,00	43	136,00
4	127,00	24	169,00	44	103,00
5	133,00	25	116,00	45	132,00
6	155,00	26	144,00	46	109,00
7	134,00	27	144,00	47	166,00
8	131,00	28	163,00	48	110,00
9	156,00	29	142,00	49	127,00
10	139,00	30	117,00	50	103,00
11	142,00	31	145,00	51	150,00
12	162,00	32	131,00	52	158,00
13	115,00	33	130,00	53	145,00
14	163,00	34	113,00	54	152,00
15	162,00	35	140,00	55	153,00
16	137,00	36	139,00	56	170,00
17	137,00	37	143,00	57	142,00
18	136,00	38	139,00	58	145,00
19	161,00	39	154,00	59	220,00
20	142,00	40	157,00	60	155,00

Fuente: elaboración propia.

Tabla XI. **Consumo de floculante, en el jugo claro durante 60 días del período a evaluar en la zafra 2013-2014**

Día de zafra	Consumo de floculante (kg/d)	Día de zafra	Consumo de floculante (kg/d)	Día de zafra	Consumo de floculante (kg/d)
1	136,00	21	183,00	41	175,00
2	129,00	22	184,00	42	157,00
3	140,00	23	163,00	43	112,00
4	123,00	24	192,00	44	138,00
5	154,00	25	156,00	45	162,00
6	155,00	26	168,00	46	177,00
7	142,00	27	177,00	47	124,00
8	167,00	28	186,00	48	163,00
9	138,00	29	164,00	49	185,00
10	170,00	30	161,00	50	174,00
11	159,00	31	176,00	51	199,00
12	160,00	32	167,00	52	150,00
13	178,00	33	170,00	53	215,00
14	161,00	34	188,00	54	183,00
15	215,00	35	149,00	55	140,00
16	197,00	36	181,00	56	187,00
17	169,00	37	153,00	57	191,00
18	220,00	38	157,00	58	174,00
19	157,00	39	183,00	59	193,00
20	173,00	40	177,00	60	203,00

Fuente: elaboración propia.

3.8. Análisis estadístico

A continuación se presentan las ecuaciones utilizadas para los cálculos efectuados en el trabajo de graduación.

3.8.1. Número de repeticiones

Para determinar el número de repeticiones necesarias para el experimento se debe fijar la confiabilidad y un error aceptado, para este caso en particular se fija una confiabilidad del 95 % y un error estimado del 20 %.

El número de repeticiones se calcula por medio de la siguiente ecuación:

$$N = \frac{Z_{\alpha/2}^2 PQ}{E^2} \quad [\text{Ec. 3}]$$

Donde

N: número de repeticiones

$Z_{(\alpha/2)}$: confiabilidad

P : probabilidad de éxito

Q : probabilidad de fracaso

E : error

Se utiliza el valor de confiabilidad de 1,96, una probabilidad de éxito de 95 %, una probabilidad de fracaso de 5 % y un error de 20 %.

$$N = \frac{1,96^2 (0,95)(0,05)}{0,20^2} = 4,56$$

Se realizarán 5 corridas con el objetivo de obtener un nivel de confianza del 95 % según la probabilidad de éxito y fracaso, aceptando un error máximo del 20 %.

3.8.2. Media aritmética

Es utilizada para encontrar el valor promedio entre las mediciones, que es la suma de todas las medidas dividida por el número de medidas.

$$\bar{x} = \frac{\sum xi}{n} \quad [\text{Ec.4}]$$

3.8.3. Desviación estándar

Es la variabilidad medida por la diferencia entre todos los valores y se representa por la siguiente ecuación:

$$s = \sqrt{\sum i \frac{(x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad [\text{Ec.5}]$$

4. RESULTADOS

Se presentan a continuación los resultados obtenidos en la realización del trabajo de graduación.

Tabla XII. **Promedio aritmético de los valores obtenidos en cuanto a la caracterización fisicoquímica del tipo de agua a utilizar**

Análisis fisicoquímico	Agua de río	Desviación estándar (σ)	Agua condensada	Desviación estándar (σ)
Conductividad ($\mu\text{S/cm}$)	295,438	5,484	169,243	47,915
Dureza del agua (ppm)	123,300	3,020	37,150	17,689
Sílice (ppb)	195,813	63,176	48,675	27,081
pH	8,079	0,359	7,257	0,173

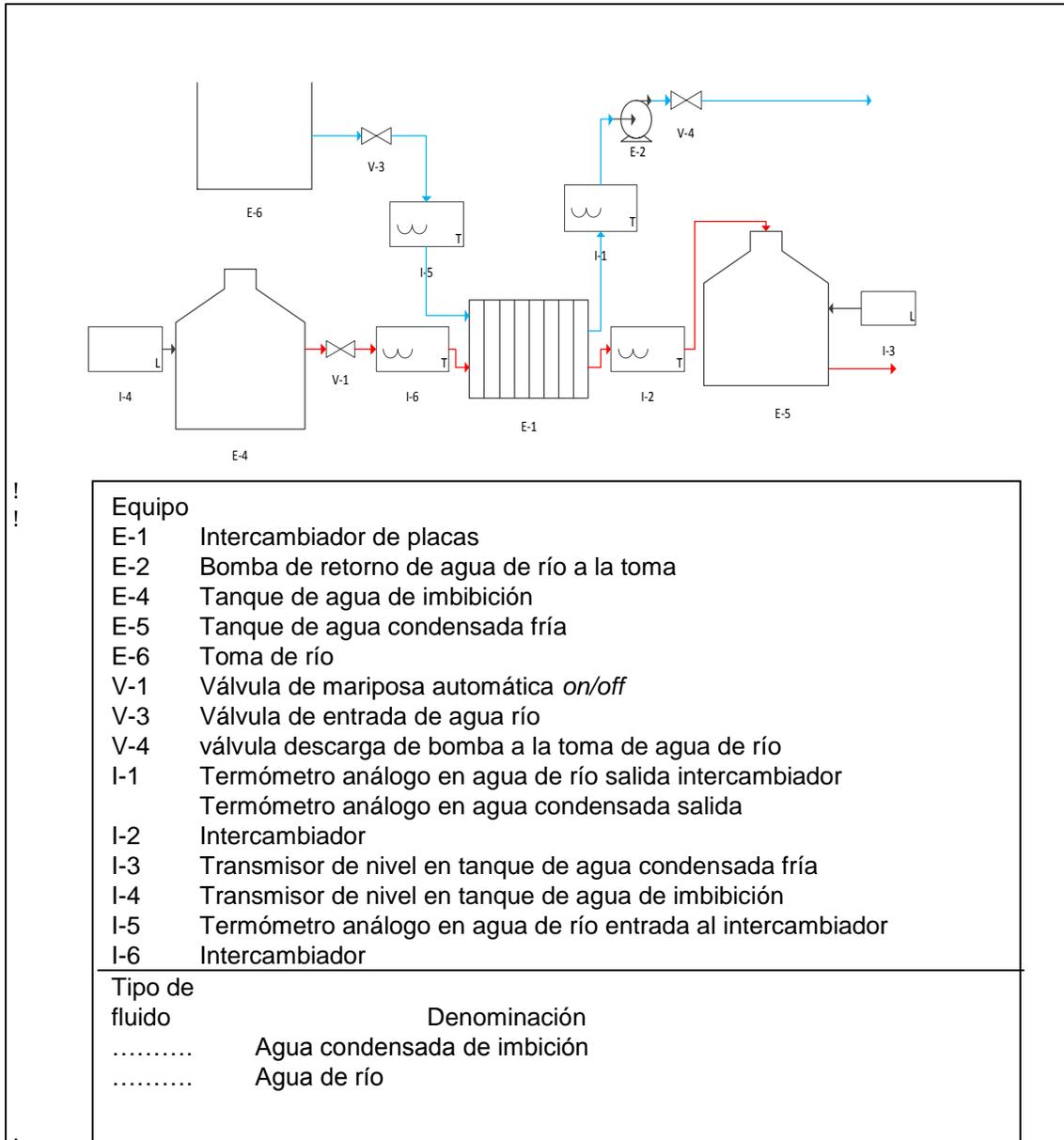
Fuente: elaboración propia, con base en la tabla II.

Tabla XIII. **Parámetros de diseño del intercambiador de placas**

Diseño del intercambiador de placas	
Diferencial ΔT_1 ($^{\circ}\text{C}$)	70,20
Diferencial ΔT_2 ($^{\circ}\text{C}$)	13,28
LMTD Paralelo	34,19
Área superficial (ft^2)	825,00
Calor cedido (Btu)	13 995 059,65
Coefficiente de transferencia del intercambiador U real ($\text{Btu/h pie}^2 \text{ }^{\circ}\text{F}$)	496,22
Coefficiente de transferencia del intercambiador U Teórico ($\text{Btu/h pie}^2 \text{ }^{\circ}\text{F}$)	500,00
Utilización del intercambiador (%)	99,24

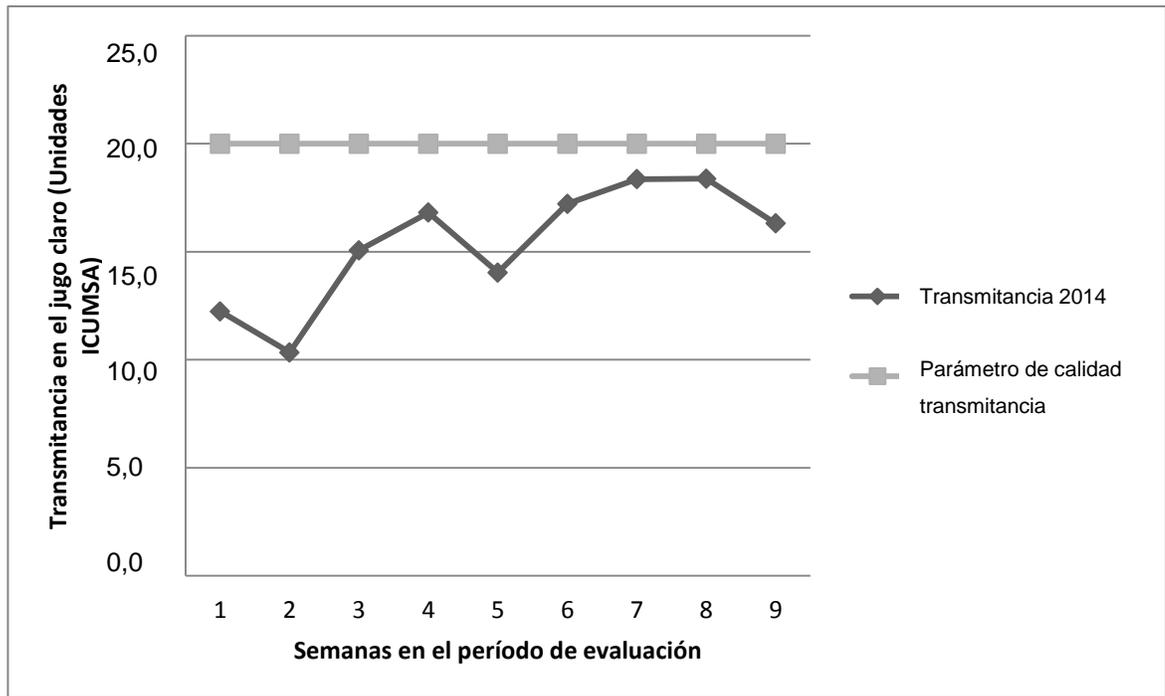
Fuente: elaboración propia, con base en la tabla II.

Figura 4. Diagrama de flujo del intercambiador de placas y sus componentes



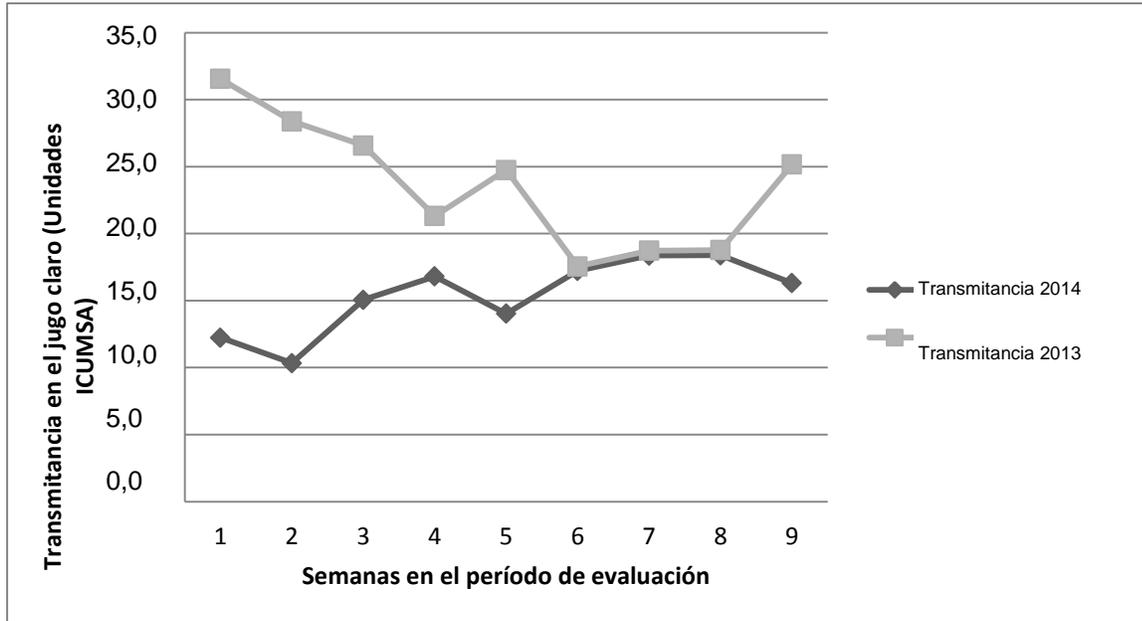
Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Visio.

Figura 5. **Resultados obtenidos en la calidad del jugo al variar la preparación de floculante con agua condensada**



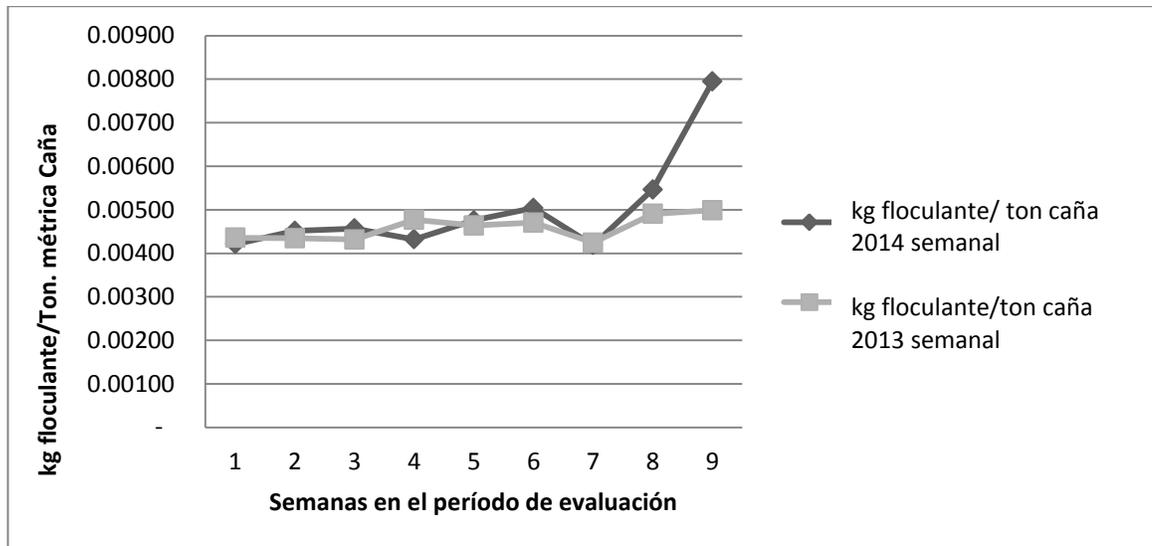
Fuente: elaboración propia, con base en la tabla IV.

Figura 6. **Comparación de la calidad del jugo durante 60 días, expresado en semanas de las zafras 2012-2013 y 2013-2014**



Fuente: elaboración propia, con base en las tablas III y IV.

Figura 7. **Comparación de los kilogramos de toneladas de caña durante 60 días, expresado en semanas de las zafras 2012-2013 y 2013- 2014**



Fuente: elaboración propia, con base en las tablas V, VI, VIII, y IX.

Tabla XIV. **Ahorro en dólares por reducción del consumo de flocculante por tonelada de caña, al comparar zafras 2012-2013 con 2013-2014**

	Media (\bar{x})	Desviación estándar (s)
Kilogramos flocculante/tonelada caña 2012-2013	0,0046	0,0005
Transmitancia en jugo claro 2012-2013	23,57	6,30
Kilogramos flocculante/tonelada caña 2013-2014	0,0049	0,0011
Transmitancia en jugo claro 2013-2014	15,37	4,18

Fuente: elaboración propia, con base en la tabla II.

Tabla XV. **Ahorro en dólares por reducción del consumo de floculante por tonelada de caña, al comparar zafras 2012-2013 con 2013-2014**

Semana de observación	Ahorro en kilogramos de floculante	Ahorro
1	26,22	\$ 117,97
2	-30,75	\$ -138,39
3	-45,26	\$ -203,68
4	83,90	\$ 377,55
5	-20,82	\$ -93,68
6	-59,19	\$ -266,34
7	9,84	\$ 44,28
8	-103,04	\$ -463,66
9	-283,27	\$ -1 274,70
	Total	\$ -1 900,64

Fuente: elaboración propia, con base en la tabla II.

5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Los análisis fisicoquímicos realizados tanto en agua condensada como en agua de río muestran cualidades que favorecen la preparación de floculante para ambos recursos. El efecto salino, que es observado a través de la dureza del agua y de la conductividad, es mayor en el agua de río que en el agua condensada. Estos parámetros son resultado de la presencia de sales en el agua. Estas sales compiten con el fosfato de calcio en su interacción con el floculante, en especial los iones de carácter positivo. También se observa que la cantidad de sílice es mayor en el agua de río. Esto incrementa la cantidad de coloides a remover del jugo clarificado, por lo tanto disminuye el rendimiento del floculante. Por otro lado, el agua de río posee un pH mayor, lo cual beneficia el rendimiento del floculante, ya que, por la naturaleza del producto químico, se logra mejorar la carga aniónica que este aporta.

Entre los resultados, también se observan variables de las dimensiones del intercambiador de placas. Los equipos como este traen de fábrica un coeficiente de transferencia de calor global, siendo en este caso de 500 Btu/h pie² °F. Este, junto con el balance térmico entre los líquidos a usar, permiten encontrar el área necesaria para lograr el intercambio de calor objetivo. Se necesitan 75 placas para obtener 825 ft² para lograr el área necesaria en la transferencia de calor.

En la figura 5 se observa el diagrama de flujo del intercambiador de placas y los componentes del sistema. Previo al intercambiador se tiene una válvula automática, la cual se abre cuando se requiere agua para la preparación de floculante. Mientras que el paso de agua de la toma de río se controla por una

válvula manual siendo V-3. A su vez, se tienen termómetros que indican la temperatura resultante en el agua condensada enfriada.

En las figura 6 se observa los resultados de la transmitancia del jugo claro durante la zafra 2013-2014, período en el que se utilizó agua condensada en la preparación de floculante.

En la figura 7 se observan los valores obtenidos en transmitancia, tanto para la zafra 2012-2013 como para la de 2013-2014. Se observa que durante las primeras semanas, la transmitancia en el jugo fue mayor en el año 2012-2013. Luego, durante las semanas 6, 7 y 8, se obtuvieron valores cercanos de la transmitancia de jugo. Varios aspectos influyen en los resultados a comparar, como la preparación de la caña y procesos anteriores a la clarificación. Se observa que, durante la zafra en que se utilizó el agua de río, los resultados de a la calidad de jugo claro fueron mayores.

En la figura 8 se observa que en las semanas 2, 3, 6, 8 y 9 el rendimiento de floculante en función de las toneladas de caña fue menor que durante la zafra 2013-2012. Se expresa en kilogramos de floculante por tonelada de caña, debido a que la operación de los ingenios crece cada año en tasa de molienda por día, y esto puede alterar los resultados al comparar los kilogramos de floculante consumidos durante la zafra 2012-2013.

La implementación del agua condensada debe reflejarse en una reducción del consumo de floculante. Se determinaron los rendimientos de kilogramos de floculante por tonelada de caña y con ello se estimó el ahorro en kilogramos de producto químico. En la tabla XVI se observa un gasto mayor durante la zafra 2013-2014 de \$ 1 900,00, que está representado como kilogramos de floculante.

6. LOGROS OBTENIDOS

Durante la operación de producción de azúcar, el área de la refinería enfrentó problemas en cuanto a la calidad del producto final. Este mostraba una cantidad de sólidos insolubles arriba de la especificación permitida, lo cual reclasificaba el azúcar refino a uno de menor calidad y, por lo tanto, de menor precio. Para solucionar problema, se compartió agua condensada fría para el uso de lavado en centrifugas del área de la refinería, esto ayudó a mejorar el problema.

Por otro lado, en el área de filtros de cachaza, se utilizan dos filtros prensa, los cuales tienen un lavado de telas, también, se compartía parte del agua condensada para uso de lavado de telas. Al utilizar agua con sedimento, este se incrusta las telas y reduce su vida útil de estas, pero al utilizar agua condensada, que posee menos sedimento, alarga su vida útil.

En el uso de agua condensada del proceso de evaporación para la preparación de floculante, se determinó que el consumo de floculante fue mayor que cuando se utilizaba agua de río. Esto representó un consumo excedente de 422.37 kg de floculante. Por lo tanto se concluyó que el utilizar agua de río bajo condiciones naturales para la preparación de floculante representa US\$ 1 900,64 de ahorro, valor del producto químico.

CONCLUSIONES

1. Los resultados de la caracterización fisicoquímica en los tipos de agua a utilizar indicaron que el agua condensada posee mejores cualidades para la preparación de floculante, a excepción del pH.
2. Se definieron las temperaturas de operación de los fluidos, diámetros de tubería, área de transferencia del intercambiador y el coeficiente de transferencia global del equipo como variables del sistema de tubería y accesorios del intercambiador de placas.
3. Se elaboró un diagrama de flujo que muestra diámetros de tubería, líneas de flujo, accesorios a utilizar y puntos de control a considerar dentro del sistema de enfriamiento del agua condensada.
4. Al modificar las características del agua a usar en la preparación de floculante, se encontró que durante 60 días de la zafra 2013-2014, la transmitancia en jugo claro no alcanzó los parámetros objetivos de control.
5. Al comparar los impactos durante 60 días de la operación usando agua condensada y agua de río, se determinó que el consumo de floculante en función de las toneladas de caña molidas fue mayor para la zafra 2013-2014, lo que representó un gasto estimado de \$ 1 900,00.

RECOMENDACIONES

1. Para determinar las variables que inciden en la calidad de jugo claro, se debe realizar un estudio que incluya variables de operación de clarificación de jugo como: pH en jugo alcalizado, contenido de fosfatos en jugo diluido, contenido de almidones en jugo alcalizado, y contenido de sulfitos en jugo.
2. Modificar el pH del agua condensada para luego evaluar el impacto que pueda tener en la preparación de floculante. En la preparación de floculante, se observó que el agua de río posee un pH que mejora el rendimiento de los floculantes anicónicos.

BIBLIOGRAFÍA

1. KERN, Donald. *Process heat transfer*. Singapur: McGraw Hill, 1965. 980 p.
2. LEVENSPIEL, Octave. *Flujo de fluidos e intercambio de calor*. España: Reverté, 1993. 392 p.
3. MARÍN CAMPO, Laura Viviana. *Determinación de las condiciones apropiadas de preparación de un floculante como componente fundamental en el proceso de clarificación de jugo en Riopaila Castilla, S. A., planta Riopaila*. Trabajo de graduación de Ing. Química. Universidad Tecnológica de Pereira, Facultad de Tecnologías, 2012. 150 p.
4. McNAUGHTON, Kenneth. *Bombas, uso y mantenimiento*. México: McGraw Hill, 1998. 373 p.
5. MILLER, James y MILLER, Jane. *Estadística y quimiometría para química analítica*. 4a. ed. Madrid: Pearson Educación, 2002. 277 p.
6. PERRY, John. *Manual del ingeniero químico*. México: Hispanoamericana, 1976. 2 v.
7. REIN, Peter. *Ingeniería de la caña de azúcar*. Berlín: Bartens, 2012. 872 p.

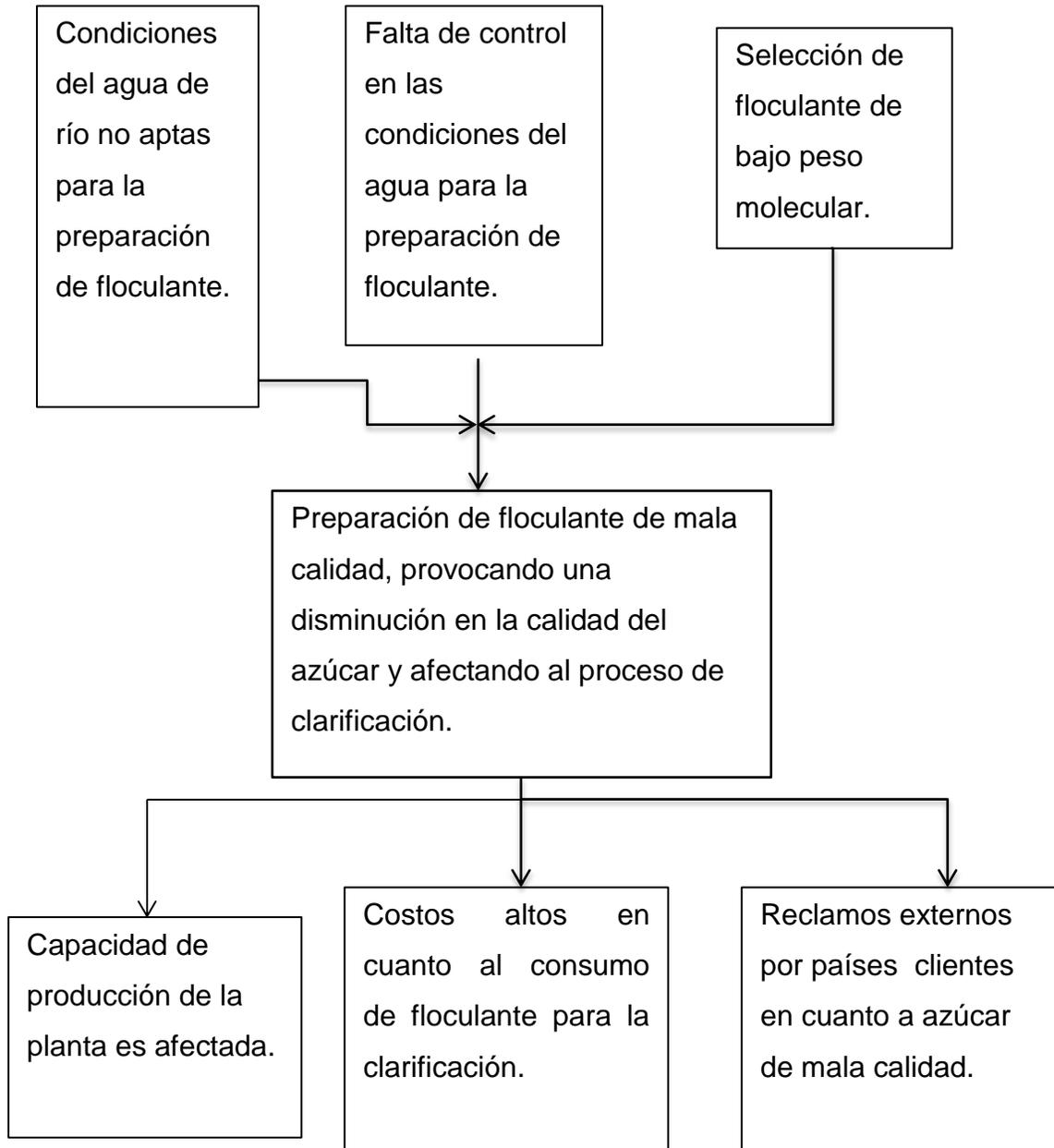
APÉNDICES

Apéndice 1. **Requisitos académicos**

Área	Cursos	Tema
Química	Química 3	Soluciones
	Análisis Cualitativo	Equilibrio ácido-base
	Análisis cuantitativo	Determinación de Mg, Fe, Al y carbonatos
Operaciones unitarias	IQ-1 Balance de masa	Balance de masa sin energía
	IQ-2 flujo de fluidos	Ecuación de Bernoulli
		Pérdidas de fricción en la tubería
		Cargas de la bomba
		Tipos de accesorios
IQ-3	Tipos de intercambiadores de calor	
Especialización	Ing. Económica 3	Evaluación de costos
Ciencias básicas	Estadística	Análisis estadístico

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. **Árbol de problemas**



Fuente: elaboración propia.

ANEXOS

Anexo 1. Análisis de grados de libertad

<i>Valor de t para un intervalo de confianza de</i> <i>Valor crítico de t para valores de P de número</i> <i>de grados de libertad</i>	<i>90%</i>	<i>95%</i>	<i>98%</i>	<i>99%</i>
	<i>0.10</i>	<i>0.05</i>	<i>0.02</i>	<i>0.01</i>
1	6.31	12.71	31.82	63.66
2	2.92	4.30	6.96	9.92
3	2.35	3.18	4.54	5.84
4	2.13	2.78	3.75	4.60
5	2.02	2.57	3.36	4.03
6	1.94	2.45	3.14	3.71
7	1.89	2.36	3.00	3.50
8	1.86	2.31	2.90	3.36
9	1.83	2.26	2.82	3.25
10	1.81	2.23	2.76	3.17
12	1.78	2.18	2.68	3.05
14	1.76	2.14	2.62	2.98
16	1.75	2.12	2.58	2.92
18	1.73	2.10	2.55	2.88
20	1.72	2.09	2.53	2.85
30	1.70	2.04	2.46	2.75
50	1.68	2.01	2.40	2.68
∞	1.64	1.96	2.33	2.58

Fuente: MILLER, J. N. & Miller, J.C. *Estadística y quimiometría para química analítica*. p. 263.

