



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

**EVALUACIÓN DEL PORCENTAJE DE REMOCIÓN DE COLOR Y TURBIDEZ
DE UN CLARIFICADOR TIPO TALOFLOC EN UNA REFINERÍA DE AZÚCAR**

Pavel Enrique Roulet Santa Cruz

Asesorado por el Ing. Carlos Roberto Morales Cuellar

Coasesorado por el Ing. Juan Pedro Quiñónez Fernández

Guatemala, septiembre de 2014

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**EVALUACIÓN DEL PORCENTAJE DE REMOCIÓN DE COLOR Y TURBIDEZ
DE UN CLARIFICADOR TIPO TALOFLOC EN UNA REFINERÍA DE AZÚCAR**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

PAVEL ENRIQUE ROULET SANTA CRÚZ

ASESORADO POR EL ING. CARLOS ROBERTO MORALES CUELLAR
COASESORADO POR EL ING. JUAN PEDRO QUIÑÓNEZ FERNÁNDEZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO

GUATEMALA, SEPTIEMBRE DE 2014

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Narda Lucía Pacay Barrientos
VOCAL V	Br. Walter Rafael Véliz Muñoz
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Otto Raúl de León de Paz
EXAMINADOR	Ing. Williams Guillermo Álvarez Mejía
EXAMINADOR	Ing. Adrián Antonio Soberanis Ibáñez
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:

EVALUACIÓN DEL PORCENTAJE DE REMOCIÓN DE COLOR Y TURBIDEZ DE UN CLARIFICADOR TIPO TALOFLOC EN UNA REFINERÍA DE AZÚCAR

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha 28 de mayo de 2014.



Pavel Enrique Roulet Santa Cruz

Guatemala, 24 de junio de 2014

Ingeniero
Víctor Manuel Monzón Valdés
Director
Escuela de Ingeniería Química

Estimado Ingeniero:


Atentamente me dirijo a usted para informarle que ha sido concluido satisfactoriamente el trabajo de graduación titulado:

EVALUACIÓN DEL PORCENTAJE DE REMOCIÓN DE COLOR Y TURBIDEZ DE UN CLARIFICADOR TIPO TALOFLOC EN UNA REFINERÍA DE AZÚCAR

Desarrollado por el estudiante de ingeniería Química **Pavel Enrique Roulet Santa Cruz**, identificado con el carné universitario **2009-15082**.

Me remito informarle, que después de haber realizado la revisión del respectivo informe y haberle hecho las correcciones pertinentes, considero que llena los requisitos para su aprobación.

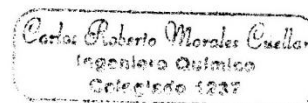
Atentamente,



Ing. Carlos Roberto Morales Cuellar

Colegiado 1237

Asesor de Tesis



Guatemala, 07 de julio de 2014

Ingeniero
Víctor Manuel Monzón Valdés
Director
Escuela de Ingeniería Química

Estimado Ingeniero:

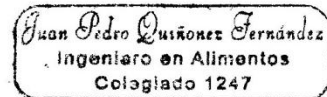
Atentamente me dirijo a usted para informarle que ha sido concluido satisfactoriamente el trabajo de graduación titulado

EVALUACIÓN DEL PORCENTAJE DE REMOCIÓN DE COLOR Y TURBIDEZ DE UN CLARIFICADOR TIPO TALOFLOC EN UNA REFINERÍA DE AZÚCAR

Desarrollado por el estudiante de ingeniería Química **Pavel Enrique Roulet Santa Cruz**, identificado con el carnet universitario **2009-15082**.

Me remito informarle, que después de haber realizado la revisión del respectivo informe y haberle hecho las correcciones pertinentes, considero que llena los requisitos para su aprobación.

Atentamente,



Ing. Juan Pedro Quiñonez Fernández

Colegiado 1247

Asesor de Tesis



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA

Balduino 1-5, Ciudad Universitaria, Zona 12, Guatemala, Centroamérica
EQD-REG-IG-008

Guatemala, 18 de agosto de 2014
Ref. EI.Q.TG-IF.028.2014

Ingeniero
Victor Manuel Monzón Valdez
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero Monzón:

Como consta en el registro de evaluación del informe final EI.Q-PRO-REG-007 correlativo **011-2014** 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

Solicitado por el estudiante universitario: **Pavel Enrique Roulet Santa Cruz**.
Identificado con número de carné: **2009-15082**.
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:

EVALUACIÓN DEL PORCENTAJE DE REMOCIÓN DE COLOR Y TURBIDEZ DE UN CLARIFICADOR TIPO TALOFLOC EN UNA REFINERÍA DE AZÚCAR

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por el Ingeniero Químico: **Carlos Roberto Morales Cuellar**.

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"

Licda. Ingrid Lorena Benítez Pacheco
COORDINADORA DE TERNA
Tribunal de Revisión
Trabajo de Graduación



C.c.: archivo



El Director de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor y de los Miembros del Tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química para revisar el Informe del Trabajo de Graduación del estudiante, **PAVEL ENRIQUE ROULET SANTA CRÚZ** titulado: "**EVALUACIÓN DEL PORCENTAJE DE REMOCIÓN DE COLOR Y TURBIDEZ DE UN CLARIFICADOR TIPO TALOFLOC EN UNA REFINERÍA DE AZÚCAR**". Procede a la autorización del mismo, ya que reúne el rigor, la secuencia, la pertinencia y la coherencia metodológica requerida.



Ing. Víctor Manuel Monzón Valdez
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química

Guatemala, septiembre 2014

Cc: Archivo
VMMV/ale

Universidad de San Carlos
de Guatemala



Facultad de Ingeniería
Decanato

DTG. 466.2014

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: **EVALUACIÓN DEL PORCENTAJE DE REMOCIÓN DE COLOR Y TURBIDEZ DE UN CLARIFICADOR TIPO TALOFLOC EN UNA REFINERÍA DE AZÚCAR**, presentado por el estudiante universitario **Pavel Enrique Roulet Santa Cruz**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
Decano



Guatemala, 10 de septiembre de 2014

/gdech

ACTO QUE DEDICO A:

Dios

Por regalarme y bendecirme cada día de mi vida y por guiar mis pasos en el cumplimiento de mis metas y sueños. También a la Virgen María por enseñarme fortalecer mi fe con el amor de madre.

Mi madre

Rosa Linda Santa Cruz Behrens, por el amor, la comprensión, el ejemplo, el apoyo y los sacrificios incomparables que has realizado en todo momento y que me han motivado para alcanzar mis metas, buscando siempre la excelencia y prudencia en mis acciones.

Mi padre

Guillermo Enrique Roulet Pierri, por enseñarme que la paciencia y perseverancia son fuentes de éxito. Tu amor incondicional y enseñanzas han sido fundamentales en el desarrollo de mi vida profesional.

Mi hermano

Joseph Rafael Leitmann Santa Cruz, que a pesar de la distancia siempre he estado en tu corazón y pensamientos. Tu cariño fraternal y consejos profesionales me han permitido afrontar la mayoría de las situaciones adversas que he enfrentado.

Mi hermano

Guillermo Stacey Roulet Santa Cruz, mi compañero de equipo, eres el *Center Field* de mi vida. Sin tu cariño, apoyo, porras y regaños, muchos de mis éxitos no serían una realidad.

Mi abuela

Mirtala Behrens (q.e.p.d.), a pesar de que te tuve únicamente tres años de mi vida marcaste mi corazón con un cariño inigualable.

AGRADECIMIENTOS A:

La Universidad de San Carlos de Guatemala	Por ser mi alma máter. La llevaré siempre en mi corazón.
Facultad de Ingeniería	Gracias por formarme en mi carrera profesional. En especial a la Escuela de Ingeniería Química: pasado digno, presente pleno, futuro brillante.
Mi Familia Roulet-Santa Cruz-Leitmann	Rosa Linda, Guillermo, Joseph, Stacey, Chloe, por su apoyo, amor, entrega y dedicación incondicional en mi vida.
Mis tías	Ana Aurora Enriquez (q.e.p.d.), Olga y Erica Behrens por sus consejos y su apoyo invaluable.
Mis primos	Paola Orellana, Sofía Orellana, María del Rosario Orellana, Alejandro Orellana, Fernando Reyes, Raiza Reyes, Osman Reyes (q.e.p.d), Luis Abad Reyes, Gustavo Girón, José Girón y Marcela Girón. Por ser cada uno especial conmigo.
Mis sobrinas	Chloe Leitmann y Ximena Archila, por las alegrías brindadas.

Mis padrinos

Dra. María Esther Fuentes y Dr. Arturo Higueros, por ser un ejemplo de superación académica.

Emmi López

Gracias por todo tu cariño y apoyo incondicional, gracias por acompañarme en este camino. Dios te pague todo lo que has hecho. Significas mucho para mí.

Emilce López Aldana

Dios la bendiga. Mi respeto y un inmenso agradecimiento con cariño. Este triunfo se debe mucho a su ayuda brindada.

Familia Morales-López-Aldana

Por recibirme en su casa y bríndame su cariño, hacerme sentir cómodo lejos de casa. Un agradecimiento especial a doña Mirna, madre e hija y a don Antonio Morales.

Ingenio La Unión

Por abrirme sus puertas y permitirme aprender.

Lic. Cupertino Mejía

Por la confianza depositada en mi persona, para la realización de este trabajo de graduación.

Amigos de La Unión

Ing. Juan Pedro Quiñónez, Ing. José Ortiz, Fernando García, Josué Figueroa y Edder Santizo, por su apoyo y consejos en la realización de este trabajo de graduación.

Mis amigos del beisbol

Diego Polanco y Hector Castellanos. Por haberme acompañado en los viajes por el mundo y brindarme su amistad.

Mis amigos del colegio

Emerson Rivera, Diego Romero, Carlos Salazar, Brandon Farfán, Billy López. Por acompañarme durante todo este tiempo y las aventuras compartidas.

Mis amigas y amigos de la universidad

Leonel Morataya, Ana Lucía Martínez, Rodrigo Ríos, Narda Pacay, Norma Castro, Pedro García, Alejandro Leppe, Nancy Castro, Carolina Corzo, Héctor Méndez, Brenda Barrios, Jaime Catalán, Licda. Ingrid Benítez, Juan Fernando Guevara, Diego Ochoa, Byron Roldán, Erick Orozco, Haniel Girón, Bryan Carrera, Luis Ernesto Aragón, Marlith de León, Andrea Arias, Indira Barreno, Gabriela Coyoy, Kevin Hernández, Jacobo Ariel, Odalis López, Juan Pablo Samaniego, Josué Tojes, Leslie García, Maira Cecaida, Pablo Aldana, Diego Rendón, Luis Fernando Mejicanos, Janiel Coyoy.

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.....	7
2.1. Refinación de azúcar.....	7
2.1.1. Disolución	9
2.1.2. Clarificación	9
2.1.3. Filtración	10
2.1.4. Cristalización	10
2.1.5. Centrifugación.....	11
2.1.6. Secado y enfriado.....	11
2.1.7. Almacenamiento	11
2.2. Clarificación	12
2.2.1. Composición del licor a clarificar	13
2.2.2. Tipos de procesos de clarificación.....	14
2.2.2.1. Sulfitación	14
2.2.2.2. Fosfatación	14
2.2.2.3. Carbonatación	14

	2.2.2.4.	Otras variantes	15
2.2.3.		Reacciones durante el proceso de clarificación	15
	2.2.3.1.	Condiciones de proceso	15
	2.2.3.2.	Agentes reaccionantes	16
	2.2.3.3.	Proteínas, aminoácidos y azúcares reductores	16
	2.2.3.4.	Turbidez	16
2.2.4.		Control de pH	17
	2.2.4.1.	Control de pH cerrado tipo PID	17
	2.2.4.2.	pH óptimo de clarificación	18
2.2.5.		Efectos del calentamiento y adición de cal	18
	2.2.5.1.	Lechada de cal y sacarato de cal	19
2.2.6.		Química básica de la floculación	20
	2.2.6.1.	Neutralización de las cargas negativas	21
	2.2.6.2.	Reducción del grado de hidratación	21
	2.2.6.3.	Enlace entre moléculas	21
2.2.7.		Mecanismo de floculación	23
	2.2.7.1.	Floculación primaria	23
	2.2.7.2.	Floculación secundaria	24
2.2.8.		Clarificación Talofloc	25
	2.2.8.1.	Tanque de reacción	28
	2.2.8.2.	Tanque de flotación	29
	2.2.8.3.	Químicos usados en el proceso	31
2.3.		Color en el azúcar refinado	31
	2.3.1.	La química de la remoción del color	32
	2.3.2.	Tipos de color	32
	2.3.2.1.	Pigmentos de la caña de azúcar	33
	2.3.2.2.	Melanoidinas	33

2.3.2.3.	Caramelos	33
2.3.2.4.	Degradación alcalina, productos de la sacarosa (ADF)	34
2.3.2.5.	No azúcares en la caña que pueden desarrollar un color	34
2.3.2.6.	Precusores de color	35
2.3.3.	Efecto de ionización y pH	35
2.3.4.	Efecto de la polaridad y pH	36
2.3.5.	Precipitantes de color y floculantes	37
2.3.6.	Comparación entre procesos de remoción de color	39
2.3.7.	Cambios de color en la práctica	40
2.3.7.1.	Oscurecimiento del licor de azúcar	40
2.3.7.2.	Color en el azúcar refinado	40
2.3.7.3.	Desarrollo del color en el procesamiento de azúcar de caña	41
3.	DISEÑO METODOLÓGICO	43
3.1.	Variables	43
3.2.	Recursos materiales disponibles (equipo, cristalería, reactivos)	46
3.3.	Técnica cuantitativa	48
3.3.1.	Técnicas cuantitativas de análisis	49
3.3.2.	Análisis de medición de color	50
3.3.2.1.	Remoción de color	51
3.3.3.	Análisis de medición de turbidez	52
3.3.3.1.	Remoción de turbidez	53
3.4.	Recolección y ordenamiento de la información	54

3.4.1.	Determinación de remoción de color y turbidez de licor en condiciones de estándar de operación ..	54
3.4.2.	Determinación de remoción de color y turbidez de licor con recirculación de jarabe	55
3.5.	Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información.....	55
3.6.	Análisis estadístico.....	56
3.6.1.	Promedio de una muestra	56
3.6.2.	Determinación de errores de muestreo	56
3.6.3.	Varianza	57
3.6.4.	Desviación estándar	57
3.6.5.	Prueba de hipótesis para el promedio de dos poblaciones con varianzas desconocidas y diferentes.....	58
4.	RESULTADOS.....	59
5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	65
	CONCLUSIONES.....	69
	RECOMENDACIONES.....	71
	BIBLIOGRAFÍA.....	73
	APÉNDICES	79
	ANEXOS.....	85

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Diagrama de flujo de una refinería de azúcar	8
2.	Formación fosfato de calcio	22
3.	Poliacrilamida hidrolizada.....	24
4.	Diagrama de bloques sistema de clarificación Talofloc.....	26
5.	Diagrama de flujo del proceso de fosflotación Talofloc	27
6.	Clarificador tipo Talofloc.....	30
7.	Reacción de Talofloc con el colorante	37
8.	Diseño general para la técnica cuantitativa.....	48
9.	Comportamiento del color de licor disuelto, licor clarificado y jarabe	60
10.	Comportamiento de la turbidez de licor disuelto, licor clarificado y jarabe	61
11.	Comportamiento del porcentaje de remoción de color y turbidez en el licor clarificado.....	62

TABLAS

I.	Historial de porcentaje de remoción de color y turbidez.....	2
II.	Comparación de azúcar blanco directo, azúcar blanco de fábrica y azúcar refinado	8
III.	Propiedades de los colorantes de caña de azúcar	36
IV.	Efecto de los procesos de decoloración en los tipos de colorante	39
V.	Variables de control en la estación de clarificación	43

VI.	Descripción operacional de las variables independientes.....	44
VII.	Descripción operacional de las variables dependientes	44
VIII.	Descripción de los métodos cuantitativos de análisis	49
IX.	Condiciones de operación estándar.....	54
X.	Condiciones de operación con recirculación de jarabe	55
XI.	Fórmulas para la prueba de hipótesis para el promedio de dos poblaciones con varianzas desconocidas y diferentes	58
XII.	Promedio de color en el licor disuelto, licor clarificado y jarabe en condiciones estándar y de recirculación	59
XIII.	Promedio de turbidez en el licor disuelto, licor clarificado y jarabe en condiciones estándar y de recirculación	59
XIV.	Promedio de remoción de color y turbidez en el licor en condiciones estándar y de recirculación	63
XV.	Prueba de hipótesis para la remoción de color y turbidez	63

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
CE	Condiciones Estándar
ρ	Densidad
gpm	Galones por minuto
°Bx	Grados Brix
°C	Grados Celsius
g	Gramos
Ha	Hipótesis alternativa
Ho	Hipótesis nula
h	Hora
L	Litro
ppm	Partes por millón
%	Porcentaje
%RC	Porcentaje de remoción de color
%RT	Porcentaje de remoción de turbidez
RJ	Recirculación de Jarabe
RDS	Sólidos disueltos refractométricos
TSSH	Toneladas de sólidos solubles por hora
UI	Unidades ICUMSA

GLOSARIO

Agua dulce	Aguas de lavado o aguas que contienen baja cantidad de azúcar.
Azúcar crudo	Azúcar moreno producido en las fábricas de azúcar, generalmente destinado a procesos posteriores en refinerías.
Brix	Medida de los sólidos disueltos en azúcar, jugo, licor o jarabe utilizando un refractómetro. Para soluciones que contienen únicamente azúcar y agua, Brix es equivalente al porcentaje de masa en azúcar.
Clarificador	Equipo para separación por sedimentación o flotación de los sólidos suspendidos en soluciones de azúcar turbias.
Color	Índice de atenuación, determinado por absorción de luz bajo condiciones definidas. Generalmente se mide empleando el método ICUMSA a 420 nanómetros, y se expresa en unidades ICUMSA o UI.
Floculante	Poli electrolito en solución añadido al licor para promover la clarificación.

Fosfatación	Clarificación utilizando ácido fosfórico y cal, en la cual ciertos no-azúcares son removidos por flotación.
ICUMSA	International Commission for Uniform Methods for Sugar Analysis.
Jarabe	Subproducto líquido generado en la centrifugación, utilizado en la cristalización tipo <i>Back-boiling</i> .
Licor	Solución azucarada preparada a partir de azúcar sin refinar.
Licor disuelto	Solución azucarada utilizada en la estación de clarificación para su tratamiento.
No azúcares	Sólidos disueltos contenidos en cualquier flujo de proceso que sean diferentes a la sacarosa.
Redisolución	Obtención de jarabe a partir del azúcar de centrífugas de baja pureza, que es disuelto o fundido de nuevo y retornado a los tachos de alta pureza.
Sólidos suspendidos	Sólidos insolubles en licor u otro líquido, que pueden ser removidos con medios mecánicos.

RESUMEN

El presente trabajo de investigación tiene como objetivo principal evaluar el comportamiento del clarificador tipo Talofloc en función de los términos de remoción de color y turbidez del licor clarificado, analizando los efectos que la recirculación del jarabe conlleva en el desempeño del mismo.

Con la finalidad de poder conocer la influencia de la recirculación de jarabe en el porcentaje de remoción de color y turbidez, se recolectaron datos de color en el licor disuelto, licor clarificado y jarabe. Se tomaron 60 días de operación con seis muestras de cada uno de los materiales, obteniendo 360 datos que representa el cincuenta por ciento de los días de fabricación de azúcar refinado de la zafra 2013-2014. Después de graficar las variables, se determinó que la recirculación de jarabe disminuye la remoción de color y turbidez del licor clarificado. A su vez genera problemas operativos tanto en la estación de clarificación como en las operaciones de filtración y cristalización.

La experimentación y análisis fisicoquímicos se realizaron en la refinería y en el laboratorio de control de calidad de Ingenio La Unión, S. A., ubicada en el kilómetro 101,5, carretera a Cerro Colorado, Santa Lucía Cotzumalguapa, Escuintla.

OBJETIVOS

General

Evaluar el comportamiento del porcentaje de remoción de color y turbidez en el licor en condiciones estándar de operación y comparar con el comportamiento del porcentaje de remoción de color y turbidez en el licor con recirculación de jarabe en un clarificador tipo Talofloc.

Específicos

1. Determinar el porcentaje de remoción de color y turbidez en el licor en condiciones estándar de operación.
2. Determinar el porcentaje de remoción de color y turbidez en el licor con recirculación de jarabe.
3. Evaluar los efectos de la recirculación de jarabe en términos de remoción de color y turbidez para el licor.

Hipótesis

Es posible que los parámetros de remoción de color y turbidez de licor en un clarificador tipo Talofloc operado en condiciones estándar se logren alcanzar al recircular jarabe en el sistema.

Hipótesis nula:

- La recirculación de jarabe en la estación de clarificación produce una reducción en el porcentaje de remoción de color y turbidez en el licor menor o igual al 5 por ciento.

$$\mu_{s/J} - \mu_{c/J} \leq 5\%$$

Hipótesis alternativa:

- La recirculación de jarabe en la estación de clarificación produce una reducción en el porcentaje de remoción de color y turbidez en el licor mayor al 5 por ciento.

$$\mu_{s/J} - \mu_{c/J} > 5\%$$

INTRODUCCIÓN

El azúcar refinado presenta los más altos estándares de calidad en la gama de los edulcorantes granulados, es preferido por el mercado internacional por sus bajos índices de color y turbidez. A su vez se adecua a la producción de distintos productos alimenticios, principalmente en las bebidas carbonatadas. La calidad del azúcar refinado depende del esquema del proceso de refinación, principalmente en la remoción de color. La combinación utilizada en la refinería estudiada para el tratamiento del licor es una purificación por clarificación-fosflotación y una decoloración utilizando carbón activado y tierra diatomeas.

Una clarificación deficiente impide obtener un licor clarificado que se adecue a los requisitos de calidad de los procesos subsiguientes. La necesidad de darle un tratamiento al jarabe reside en aumentar la recuperación de sacarosa en una refinería de tipo *Back-boiling*.

La clarificación de jarabe en un clarificador tipo Talofloc en el proceso de refinación de azúcar presenta complicaciones operativas debido a que el clarificador está diseñado para purificar exclusivamente licor de azúcar. Las características fisicoquímicas como el Brix, color, turbidez y viscosidad del jarabe dificultan su tratamiento por clarificación, principalmente en la fosflotación. Esta operación unitaria está diseñada para separar por flotación las impurezas adheridas al fosfato de calcio en forma de espuma, la viscosidad del jarabe genera partículas de espuma de alto peso pudiendo propiciar su precipitación y no flotación.

El clarificador tipo Talofloc está diseñado para remover entre el 50 y el 90 por ciento de turbidez y de 10 a 40 por ciento de color, por lo tanto, es necesario evaluar el comportamiento del clarificador cuando se trata jarabe para determinar la viabilidad del proceso para purificar este producto.

1. ANTECEDENTES

Muchos productos han sido utilizados para la purificación de licor en la refinación de azúcar, uno de los más utilizados por su facilidad de operación es la denominada fosfatación, donde se emplea ácido fosfórico y sacarato de cal para encapsular las impurezas en la superficie de los compuestos de fosfato de calcio generados.

La operación de fosfatación fue introducida para la refinación de azúcar por los desarrolladores de procesos Tate & Lyle en 1920, desde entonces ha sido ampliamente usada en la industria azucarera. El clarificador tipo Talofloc está diseñada para el tratamiento de licor y no de una proporción de recirculación de jarabe, con el presente trabajo de graduación se busca encontrar condiciones de operación que permitan tratar este producto y que el licor clarificado de salida cumpla con los parámetros de control de porcentaje de remoción de color y turbidez.

La refinería en estudio ha incurrido a la práctica de recirculación de jarabe debido a la necesidad de aumentar la recuperación de sacarosa, que por el diseño del sistema *Back-boiling* de la planta implica retornar el jarabe a la fábrica de azúcar crudo. El retorno de jarabe a la fábrica representa un 16 por ciento (104 000 kg) al día de azúcar crudo o blanco no aprovechado para producir azúcar refinado, este último presenta un valor comercial mayor.

Existen dos razones por las cuales se retorna jarabe a fábrica:

- El color del jarabe supera las 2200 UI.
- Los tanques que contienen el producto se encuentran a 95 por ciento de su capacidad.

Con la recirculación de una proporción de jarabe a la estación de clarificación el retorno del mismo a fábrica disminuye hasta un 17 por ciento (101 995 kg) de azúcar crudo o blanco, incrementando la recuperación de sacarosa en un 5 por ciento.

Durante las dos zafras anteriores la recirculación de jarabe representó una disminución de remoción de color y turbidez significativa, la tabla I enlista el comportamiento del clarificador:

Tabla I. **Historial de porcentaje de remoción de color y turbidez**

Zafra 2011-2012				Zafra 2012-2013			
Sin Recirculación		Con Recirculación		Sin Recirculación		Con Recirculación	
%Remoción Color	%Remoción Turbidez	%Remoción Color	%Remoción Turbidez	%Remoción Color	%Remoción Turbidez	%Remoción Color	%Remoción Turbidez
22%	85%	17%	70%	24%	83%	19%	73%

Fuente: Ingenio La Unión, S.A.

Con el presente trabajo de graduación se pretende encontrar las condiciones de operación del clarificador tipo Talofloc que permitan clarificar el jarabe de manera que cumpla con los parámetros establecidos para el licor clarificado de remoción de color y turbidez.

Las principales investigaciones realizadas sobre el tema son:

- En 2010, en la LXV Conferencia Anual de Tecnólogos Azúcareros Norteamericanos, fue presentada la investigación titulada: *Pros and cons of various decolorization processes for production of refined sugar*. Realizada por el Dr. Chung Chi Chou, fueron revisadas las ventajas y desventajas de cada proceso de decoloración, en especial los problemas asociados con la combinación de fosfatación con el sistema de simple cocimiento, a su vez se estudia la redundancia y la ineffectividad en remoción de color de la utilización de la fosfatación con decolorante y el proceso de intercambio iónico.

El proceso de *Back-boiling* contiene únicamente un cocimiento, el jarabe es retornado a la estación de disolución mezclándose con el azúcar crudo VHP disuelta y ésta es enviada de nuevo al clarificador. Este sistema de simple masa, se recircula el jarabe hasta 60 ciclos o hasta que este alcanza un color de 2200 UI, antes de ser enviado de vuelta a la fábrica de azúcar crudo. El sistema presenta varias desventajas, la contaminación del licor de azúcar debido a las partículas insolubles que son reintroducidas al proceso en la estación de clarificación por la recirculación de jarabe, existe un alto consumo de químicos durante la clarificación, excesiva pérdida de sacarosa y baja recuperación de azúcar debido al prolongado y repetido cocimiento del jarabe recirculado, excesivos lavados en la estación de centrifugación para alcanzar el color del azúcar refinado deseado.

La opción de operar el clarificador tipo Talofloc con recirculación de jarabe es poco viable tanto operacional como económicamente.

- En 2009, en el marco del Congreso de la Asociación Australiana de Tecnólogos de Azúcar, fue publicada la investigación titulada: *Raw sugar quality from a refiner's perspective*, realizada por Terry Jansen, en el cual estudiada la calidad del azúcar crudo como factor fundamental en la operación de refinación. Un bajo contenido de dextrana (< 40 ppm) y almidón (< 80 ppm), son de principal importancia para lograr una clarificación adecuada, debido a que una alta concentración de estos componentes incrementan significativamente la viscosidad del licor, dificultando la mezcla de los químicos agregados en la fosfatación.
- En 2008, en el Congreso de la Asociación Sudafricana de Tecnólogos de Azúcar, fue presentada la investigación titulada: *The chemistry of color removal*, realizada por S. B. Davis, en la cual estudió los procesos de purificación de jugo y licor de azúcar determinando las características de cada uno.

Menciona que la necesidad de utilizar clarificadores por flotación para el tratamiento es necesario en vez de los clarificadores por sedimentación debido a la alta viscosidad del jarabe. Representa a su vez un costo bajo operación para la purificación del licor. Reporta un porcentaje de remoción de color en el intervalo de 5-10 por ciento y un porcentaje de remoción de turbidez en el intervalo de 80-95 por ciento disminuyendo la viscosidad del material.

- En 2000, en la revista *International Sugar Journal* fue publicada la investigación titulada: *Some developments in flotation clarification*, realizada por IA Smith, GT Schumann y DC Walthew, en la cual fueron estudiados las condiciones de operación de clarificadores que funcionaban con los procesos de fosfatación y sulfitación.

Tres aspectos operativos fueron estudiados: la adición de aire, el calentamiento del licor y el tamaño de la capa de espuma. Para que la espuma generada por la adición de sacarato de cal y ácido fosfórico flote es necesario introducir burbujas de aire en el rango de 5 a 20 micrones, éstas son incorporadas entre el floc formado por el floculante. Las burbujas que son muy grandes se revientan y permite que la partícula de floc formada se hunda. La temperatura de operación del clarificador se debe mantener en el rango de 85-90 grados Celsius, temperaturas superiores fomenta la formación de color y pérdidas de sacarosa. El tamaño de la capa de espuma aunado al flujo de licor determina el tiempo de residencia en el clarificador, una capa muy fina no permite la separación apropiada de la espuma con el licor, una capa muy gruesa reduce el tiempo de residencia del licor en el clarificador.

- En 1996, en una conferencia del Proyecto de Investigación de Azúcar de New Orleans, Estados Unidos, fue presentada la investigación titulada: *Degradation of sucrose across the Talo™ clarification process*, realizada por Gillian Eggleston, A. B. Pepperman y Margaret Clarke, se estudió las pérdidas químicas de sacarosa y la formación y degradación de productos en un el proceso de clarificación tipo Talo™ en una refinería de azúcar.

En la investigación se determinó que compuestos no-azúcares, incluyendo color, son producidos en el sistema de desendulzado de espuma y son reciclados al proceso como agua dulce. Azúcares invertidos son simultáneamente formados y degradados durante el proceso de fosfatación.

- En 1992, en el Congreso de la Asociación Sudafricana de Tecnólogos de Azúcar, fue presentada la investigación titulada: *A decade of refining at Noosberg*, realizada por R. R. Sanders, presenta un estudio de la remoción de color durante la clarificación.

Durante dos zafras el clarificador fue utilizado el sistema Talofloc, pero posterior a este tiempo ya no fue empleado debido a resistencia de compra del azúcar refinado por parte de los productores de bebidas que creían que residuos de Talofloc afectaban sus procesos. Durante este tiempo las demandas de remoción de color y turbidez no fueron alcanzadas, variando entre el 15 y 20 por ciento. No fue posible alcanzar los niveles de 30 y 40 por ciento de remoción de color referido por la literatura. Puede ser atribuido a los colores bajos de licor disuelto.

- En 1977, en el Congreso de la Asociación Sudafricana de Tecnólogos de Azúcar, fue presentada la investigación titulada: *Some aspects of flocculant use in the phosphatation process*, realizada por F. M. Rungass y G. S. Shepard, presenta un estudio de la remoción de color durante la clarificación por la aplicación de diversos floculantes.

Los floculantes propician la remoción de color y almidón en el licor, a su vez aumentan su filtrabilidad en caliente.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Refinación de azúcar

Aunque una limitada cantidad de azúcar morena es producida en algunas fábricas de azúcar crudo para consumo directo, la mayor parte del azúcar producido se refina para producir un azúcar de alta pureza y bajo color tal como se requiere en el mercado.

La principal tarea de las refinerías es la remoción de color, pero este proceso también reduce la cantidad de componentes diferentes a la sacarosa. La refinación involucra además etapas de filtración que remueven sólidos insolubles del azúcar crudo. El proceso de refinación de azúcar está detallado en la figura 1.

Los procesos de producción de azúcar varían según el tipo de fabricación, para esto las operaciones y equipos varían según estas demandas. Trott (1988) realizó un estudio comparativo entre las calidades del azúcar refinado, blanco directo y blanco de fábrica, que puede ser apreciado en la tabla II.

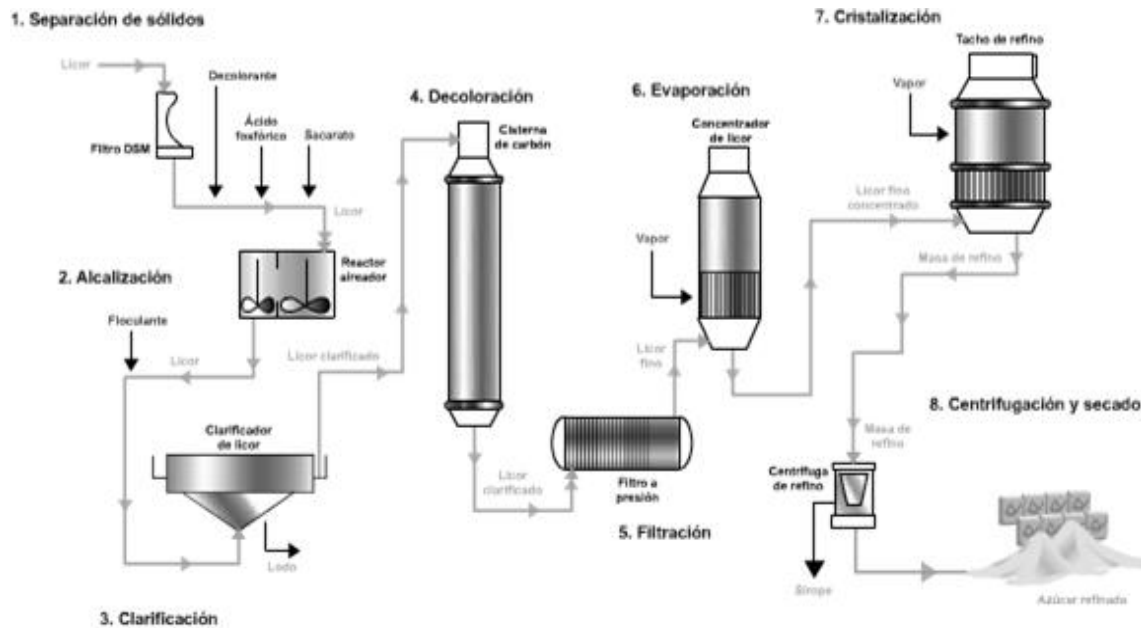
La refinación de azúcar en Guatemala usualmente se realiza en conjunto con la producción de azúcar blanco, en época de zafra, debido a que las refinerías se encuentran contiguas al ingenio, con lo cual se aprovechan los recursos, principalmente el vapor. Con esto se reduce la cantidad de azúcar crudo exportado, generando un mayor valor agregado a la industria nacional. El azúcar refinado posee características de inocuidad características debido a la calidad solicitada por el mercado internacional.

Tabla II. **Comparación de azúcar blanco directo, azúcar blanco de fabrica y azúcar refinado**

Propiedad	Refinado	Blanco Directo	Blanco de fábrica
Polarización	99,9	99,8	99,6
Color en UI	10-80	100-200	200-250
Turbidez (ICUMSA)	10-30	20-50	100-500
Cenizas en g/100g	0,01-0,04	0,05	0,1
Azúcares invertidos en g /1000g	0,01-0,04	0,02	0,1
SO2 en mg/kg	-	1-5	20-50

Fuente: REIN, Peter. *Ingeniería de la Caña de Azúcar*. p. 613.

Figura 1. **Diagrama de flujo de una refinería de azúcar**



Fuente: CENICAÑA, diagrama de refinación de azúcar.

http://www.cenicana.org/pop_up/fabrica/diagrama_refinacion.

Consulta: 23 de marzo de 2014.

2.1.1. Disolución

El proceso consiste en disolver azúcar crudo o blanco utilizando agua dulce de alta calidad, obteniendo un licor de azúcar aproximadamente a 64 Brix, este producto es posteriormente usado en la clarificación. El objetivo de la disolución es producir un licor fundido con 65 Brix a 75 grados Celsius. Valores inferiores de RDS conducen a mayores demandas de vapor, siendo deseable operar con el máximo valor posible de RDS que sea consistente con las operaciones posteriores.

La temperatura puede alcanzar valores tan elevados como 85 grados Celsius, se recomienda utilizar menores temperaturas del fundido para minimizar la formación de color; se ha establecido un mínimo alrededor de 70 grados Celsius debido a la potencial actividad microbiana a menores temperaturas. El tiempo requerido para la disolución del azúcar depende de la temperatura, la concentración de sólidos disueltos y el tamaño de los cristales a disolver. Tiempos de 20 a 30 minutos son normales.

2.1.2. Clarificación

El proceso de clarificación de licor de azúcar tiene como objetivos primordiales remover la máxima cantidad de impurezas disueltas y suspendidas en el licor e incrementar su pH, con el fin de minimizar la inversión de sacarosa en este y en los procesos posteriores. La efectividad de la clarificación determina la filtrabilidad del licor en las estaciones de filtros. Cualquier partícula que permanezca en el licor clarificado puede causar incrustaciones en el cristal de azúcar. Los procesos de clarificación en la refinación de azúcar más ampliamente usados son los de carbonatación y fosfatación, este último será desarrollado posteriormente por ser el utilizado en la refinería.

2.1.3. Filtración

La filtración a presión es necesaria para remover la turbidez y los sólidos suspendidos en el licor. En el caso de la carbonatación es una parte del proceso, donde la torta de carbonato de calcio proporciona la ayuda filtrante requerida. En otros casos, tierras diatomáceas o perlita son adicionadas al licor como ayuda filtrante para poder lograr las tasas de filtración requeridas. En casos donde se utiliza carbón en polvo para la decoloración, el carbón es removido en la filtración junto con la ayuda filtrante adicionada.

2.1.4. Cristalización

En esta estación se concentra el licor hasta un punto de saturación en el cual al sembrar una solución saturada de alcohol con cristales de azúcar, se promueve la formación de cristales que se alimentarán con una combinación de licor y jarabe (subproducto de centrífugas) para incrementar su tamaño y la pureza de los cristales generados. Se busca obtener una cantidad, tamaño y coeficiente de variación óptimo en la mezcla de cristales y jarabe denominada masa cocida.

Los diseños de tachos para refinería son similares a los utilizados en la fábrica de crudo, pero generalmente con una mayor proporción entre el área de calentamiento/volumen. Debido a las menores viscosidades y mayores tasas de transferencia de calor, los tubos pueden ser más largos que en los tachos que procesan masas con menores purzas sin ningún deterioro de desempeño.

2.1.5. Centrifugación

La finalidad de la centrifugación es la separación de las masas cocidas, obteniendo como producto azúcar húmeda y como subproducto jarabe. Aprovechando la fuerza centrífuga producida por la rotación, la masa cruda cargada en la canasta de la máquina centrífuga se pega a las paredes de la misma donde los cristales quedan retenidos y el jarabe pasa a través de las perforaciones descargándose en un tanque.

2.1.6. Secado y enfriado

El contenido de humedad del azúcar al finalizar la separación centrífuga no mantiene un nivel apropiado para su manipulación y almacenamiento. La función de secado busca reducir el contenido de humedad del azúcar al mínimo para impedir el desarrollo de microorganismos que puedan ocasionar el deterioro del producto. La humedad relativa del azúcar refinado a producir debe ser menor de 0,04 por ciento a una temperatura de 28 grados Celsius para evitar aterronamientos dentro del silo. Las opciones de acondicionamiento son determinadas por el tipo de azúcar a ser almacenada.

2.1.7. Almacenamiento

La forma de almacenamiento del azúcar refinado incide en la calidad que presenta al momento de su empaque y transporte a los mercados de consumo. Es muy importante que en las bodegas de acopio se mantenga un control estricto en la temperatura y porcentaje de humedad, para evitar posibles explosiones, aterronamientos y deterioros del azúcar refinado.

De acuerdo con Rein (2012) el almacenaje de azúcar refinado se lleva a cabo en una de cuatro formas:

- Contenedores y tolvas, para picos de almacenaje de corta duración; con una capacidad de pocos cientos de toneladas.
- Silos a granel de almacenaje a corto plazo, de construcción cilíndrica alta, frecuentemente utilizados para acondicionamiento; capacidad típica de 1 000 a 3 000 toneladas.
- Silos a granel de almacenaje a largo plazo, de baja relación de aspecto (relación de altura y ancho, en este caso bajos o ancho); capacidad típica de 20 000 a 80 000 toneladas.
- Bodegas de azúcar empacadas en sacos.

2.2. Clarificación

Rein (2012) refiere que el objetivo primordial de la clarificación es eliminar la máxima cantidad de impurezas del licor, tomando en consideración aspectos como la calidad del licor, las pérdidas de sacarosa en el proceso y las condiciones óptimas de la operación, los objetivos a conseguir se podrían resumir en los ocho aspectos siguientes:

- Máxima eliminación de no azúcares
- Máxima eliminación de coloides
- Licor con baja turbidez
- Mínima formación de color
- Volumen mínimo de lodo
- Mínimo contenido de calcio en el licor claro
- pH del licor adecuado, para evitar inversión de sacarosa o descomposición de azúcares reductores

El éxito de la operación de clarificación puede determinarse midiendo y controlando los parámetros de calidad de remoción de turbidez y color. Cientos de reactivos han sido probados para ser utilizados en la purificación de licor. Sin embargo, únicamente cinco han logrado importancia industrial:

- Cal (CaO) que desde los principios de la industria azucarera se ha mantenido como el purificante básico universal, el tratamiento por cal es llamado defecación.
- Ácido sulfuroso, proveniente del SO₂, denominado sulfitación.
- Ácido fosfórico, proveniente del P₂O₅, denominado "fosfatación.
- Ácido carbónico, proveniente del CO₂, denominado Carbonatación.
- Magnesia, MgO.

2.2.1. Composición del licor a clarificar

Materiales insolubles tales como ceras, grasas, bagacillo, suelo, arena y partículas de arcilla son comunes. El tamaño de estas partículas está en un rango de 0,5 micrómetros a 2 milímetros. La naturaleza y propiedades superficiales de las partículas determinan su comportamiento fisicoquímico durante la coagulación y floculación.

Doherty y Edye (1999) indican que los principales componentes del licor de azúcar de caña que influyen la clarificación son:

- Sacarosa, azúcares reductores, monosacáridos
- Polisacáridos (dextranas, gomas, almidón) y trisacáridos
- Proteínas, compuestos de amino-nitrógeno
- Ácidos orgánicos (aconítico, málico, cítrico), sales de ácidos orgánicos
- Sales de ácidos inorgánicos (ej. KCl, CaSO₄, fosfatos)

2.2.2. Tipos de procesos de clarificación

La calidad del azúcar que se quiera obtener, determina el proceso de clarificación a utilizar en el diseño en una planta de obtención de azúcar, a continuación se describen los más importantes:

2.2.2.1. Sulfitación

Esta combina el tratamiento con ácido sulfuroso (a partir del gas SO_2) y con soluciones de cal. La sulfitación puede ser realizada sobre jugo frío o caliente, así como también sobre meladura de los evaporadores (doble sulfitación).

2.2.2.2. Fosfatación

Pequeñas cantidades de fosfato soluble pueden añadirse a los jugos para mejorar la defecación simple. La adición de grandes cantidades se conoce con el distintivo de fosfatación. La técnica de fosfatación se utiliza principalmente para la clarificación de jarabes en fábricas de crudo y refinerías.

2.2.2.3. Carbonatación

Es el tratamiento del jugo encalado con dióxido de carbono, seguido de una aplicación de cal para neutralizar el jugo. Actualmente se utiliza este proceso sólo en raras ocasiones para la clarificación de jugo, pero continúa siendo un proceso básico en la clarificación y decoloración de jarabes de refinería.

2.2.2.4. Otras variantes

Otra variante, que frecuentemente se presenta como un medio para reducir el contenido de Ca^{+2} en el jugo clarificado y por lo tanto reducir los problemas de incrustación en las superficies de transferencia de calor de los evaporadores, es la sustitución con magnesia (óxido de magnesio MgO) de una parte o de toda la cal (óxido de calcio, CaO) para el tratamiento del jugo. Sin embargo esta práctica no ha logrado difundirse.

En la clarificación industrial del jugo se pueden combinar varios o todos estos tratamientos. Para la implementación de tratamientos se pueden utilizar varios métodos para separar las impurezas precipitadas (sedimentación, flotación y filtración) y así también existe un amplio rango de tecnologías y diseños de los equipos de proceso.

2.2.3. Reacciones durante el proceso de clarificación

Honig (1982) señala que un amplio rango de reacciones químicas y físicas ocurren en el licor, las cuales dependen de: la condiciones del proceso, debido a agentes reaccionantes propios de los suelos de cultivo de la caña, el contenido de agentes no azucares y de la turbidez del jugo.

2.2.3.1. Condiciones de proceso

Las condiciones del proceso determinan las principales reacciones que se dan en el proceso de clarificación, se pueden clasificar en cuatro grupos: cambio de pH, cambios en la concentración de Ca^{+2} , incremento en la temperatura y la inversión de la sacarosa debido a una disminución significativa de pH.

2.2.3.2. Agentes reaccionantes

La principal reacción química es aquella entre el catión calcio Ca^{+2} y el ion fosfato para la formación de fosfatos intermedios y la precipitación del fosfato tricálcico $\text{Ca}_3 (\text{PO}_4)_2$.

2.2.3.3. Proteínas, aminoácidos y azúcares reductores

La proteína es desnaturizada por el calentamiento (la temperatura de desnaturización cambia con el pH), luego rodea a las partículas sólidas y a los flocs de fosfato e imparte una aparente carga negativa. El encalado en caliente usualmente produce una desnaturización más completa, dado que el punto isoeléctrico de muchas proteínas se encuentran por debajo de $\text{pH}=6$.

Los aminoácidos no sufren cambios importantes debido a la clarificación, aunque a valores elevados de pH pueden reaccionar con los azúcares reductores generando incrementos de color. Usualmente los azúcares reductores también son estables, aunque pueden ser destruidos a valores elevados de pH y temperaturas que excedan 100 grados Celsius. La tasa de reacción no es significativa con un pH de 6, pero aumenta por un factor de 5 por cada unidad de pH incrementada.

2.2.3.4. Turbidez

Según Chen (1976) la turbiedad del licor clarificado se debe a coloides y otras partículas que no se logran remover en la clarificación. La preparación y aplicación inadecuada del floculante, un mal control del encalado puede contribuir a una elevación de la turbiedad.

2.2.4. Control de pH

El principal factor en la clarificación es el control del pH del licor, el cual es afectado por el de flujo y temperatura de licor, el flujo de sacarato de cal y la cantidad de ácido fosfórico agregado. El tipo básico de control utilizado para la clarificación consiste en un lazo cerrado de control de pH continuo, el cual está asistido por otros lazos de control para homogenizar el flujo de jugo y controlar la temperatura de los calentamientos.

El uso de medidores de pH, en conjunto con válvulas y reguladores para la aplicación automática de la cal, ha conducido a mejoras sustanciales de la clarificación. Matic (1969) indicó que el sensor de pH tiene que ser ubicado en un punto donde la cal y el jugo se encuentren mezclados apropiadamente, ni muy cerca ni muy lejos del punto donde la cal ha sido adicionada.

Con buena tecnología es posible reducir las variaciones de pH en la alimentación del clarificador hasta un rango de $\pm 0,15$ unidades. Variaciones muy altas en el pH del jugo encalado pueden generar problemas por reacciones retardadas en el clarificador, causando floculación variable, incremento de la turbiedad del jugo clarificado y un aumento de incrustaciones en los evaporadores.

2.2.4.1. Control de pH cerrado tipo PID

De acuerdo con Rein (2012) El controlador de lazo cerrado más importante es el PID (proporcional, integral, diferencial). En un controlador PID la señal es igual a la suma de un término proporcional y uno integral y diferencial de error de control (diferencia entre la variable controlada y el valor deseado).

2.2.4.2. pH óptimo de clarificación

El pH final del jugo que se envía a los evaporadores es importante. Hugot (1986) afirma que cuando se requiere producir azúcar blanco es deseable tener un jugo ácido y el pH debe mantenerse en un rango de 6,4 a 6,6. Esto reduce el color del azúcar con el riesgo de una inversión significativa de sacarosa.

A medida que el pH del producto de azúcar se reduce, la apariencia de color es menor y esto constituye una ventaja, aunque los métodos analíticos estándar deberían corregir este efecto mediante el ajuste de pH con soluciones de Hidróxido de sodio (NaOH) hasta un valor constante. En este caso de que se requiera producir únicamente azúcar crudo de buena calidad, Hugot (1986) sugiere que se puede permitir que el jugo se conserve ligeramente alcalino, con un pH entre 7,1 y 7,5. Esto minimiza la pérdida de sacarosa por inversión, aunque advierte que el jugo alcalino reduce la velocidad de los tachos y dificulta la cristalización.

2.2.5. Efectos del calentamiento y adición de cal

La utilización de calor y cal, es la preferida en la industria azucarera, debido a su fácil implementación y bajo costo de reactivos. Honig (1982) alude que la clarificación por defecación usualmente se realiza mediante la combinación de:

- Adición de hidróxido de calcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$ para elevar el valor de pH desde 5.3 hasta 7,2 a 8,0. Puede ser aplicado como sacarato de cal.
- Calentamiento por etapas, hasta el punto de ebullición y uso de un tanque flash de despresurización y purga rápida que permite remover el aire atrapado o disuelto en el jugo.

El principal agente de precipitación es el fosfato de calcio, que forma la base de los flóculos que absorben la mayoría de los otros materiales precipitantes. Sin embargo, como fue discutido por Doherty y Edye (1999), existen varias fases del fosfato de calcio (incluyendo fosfatos de mono- di- y tri- calcio) que se forman durante el encalado. El fosfato tricálcico se precipita a una velocidad relativamente lenta y los ácidos orgánicos presentes inhiben esta precipitación. La eliminación física de las impurezas no es completa dependiendo del valor del pH en el jugo luego del tratamiento, el contenido residual de Ca^{++} puede ser mayor que su contenido original del jugo.

2.2.5.1. Lechada de cal y sacarato de cal

Doherty et al. (2002) menciona que la composición de la mezcla de cal tiene un efecto significativo sobre la operación del sistema de clarificación. Con lechada de cal se producen flóculos y lodos de mayor densidad, pero la turbiedad obtenida no es tan buena, mientras que las soluciones de sacarato preparadas utilizando jugo o meladura resultan en flóculos más ligeros que se sedimentan con menor velocidad, pero la turbiedad es mejor. La reacción de la cal puede hacerse más rápida cuando se cuenta con un sistema de encalado con sacarato. La presencia de sacarosa produce un incremento apreciable en la solubilidad de la cal, que puede multiplicarse hasta por 100 veces. La solubilidad de cal en jugo incrementa con su contenido de sacarosa y decrece a medida que la temperatura aumenta.

Las reacciones del sacarato en licor son aún más rápidas y permiten obtener un mejor licor clarificado. Otras ventajas del uso de sacarato de cal sobre la lechada de cal incluyen un mejor control de pH y mejor porosidad en la torta de filtros.

Una preocupación con respecto a la preparación del sacarato de cal es que la meladura o el licor se exponen a condiciones de pH elevado, por lo que ocurrirá una cierta degradación de los azúcares reductores acompañada de un incremento en la concentración de ácidos orgánicos. Sawhney (1997) estudió este problema, concluyendo que es deseable que la temperatura en el tanque de mezclado del sacarato de cal se conserve por debajo de 50 grados Celsius y que el tiempo de residencia sea minimizado.

2.2.6. Química básica de la floculación

El proceso de floculación se ha usado en la etapa de defecación en la fabricación de azúcar. Este proceso provee el mecanismo por medio del cual las impurezas insolubles suspendidas se agregan en flóculos que son convenientes para la separación por las unidades convencionales de sedimentación (clarificadores).

Chen (1985) refiere que el rango de impurezas removidas por el proceso de floculación puede ser el mejor descrito con referencia al tamaño de la partículas, que se extiende de partículas que se observan a simple vista, por ejemplo los pedazos de caña, el bagacillo y las partículas de tierra, hasta moléculas de gran tamaño en el rango de los coloides, como por ejemplo los polisacáridos, las proteínas y complejos de silicatos. A este rango deben ser agregados esas impurezas que son adsorbidas en la superficie de cualquier fase sólida presente en el sistema, o que son precipitadas durante el tratamiento químico y físico que ocasionan la floculación, por ejemplo las proteínas desnaturalizadas y sales de calcio insolubles.

2.2.6.1. Neutralización de las cargas negativas

Chen (1985) señala que la magnitud de la carga depende del pH, y el punto isoeléctrico es alrededor del pH 3,5, la floculación puede ser provocada por la adición de ácido (o SO₂) debajo de este pH. Alternativamente, la carga puede ser neutralizada por la adición de surfactantes catiónicos orgánicos o por cationes inorgánicos polivalentes.

2.2.6.2. Reducción del grado de hidratación

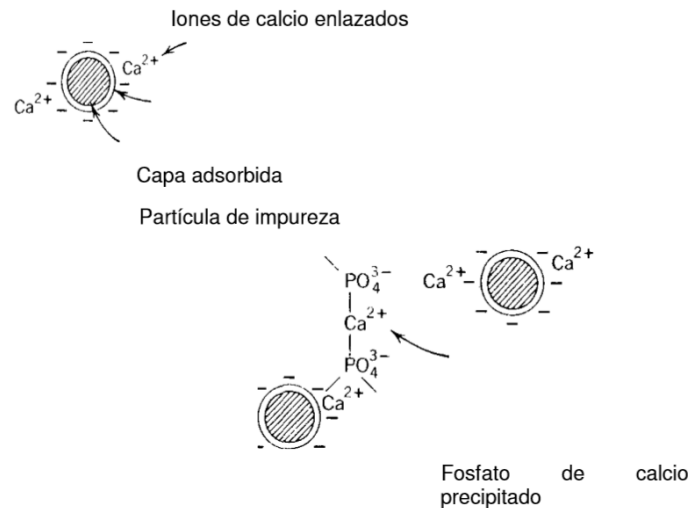
Esto ocurre cuando el jugo es calentado a punto de ebullición, causando a un número de componentes proteínicos la precipitación y son depositados en la superficie de partículas suspendidas. Esta precipitación (desnaturalización) es un efecto de la deshidratación, la superficie de las partículas se vuelve menos hidratada, y la suspensión menos estable.

2.2.6.3. Enlace entre moléculas

Doherty et. al. (1999) señala que esta es la base de todos los procesos de floculación corrientes usados en la industria azucarera, y envuelve la formación, *in situ*, de un precipitado inorgánico. En la clarificación de licor, esto ocurre con la adición de sacarato de cal hasta valores de pH en licor clarificado entre 6,8 a 7,2, entonces los fosfatos inorgánicos contenidos en forma natural en el jugo de caña son precipitados en varias especies de fosfatos de calcio. La razón de la notable y eficiente floculación de este precipitado de fosfato de calcio, no se conoce del todo, pero la evidencia obtenida sugiere que es efecto es dependiente principalmente de los iones de calcio destinados a ser adsorbidos por la capa proteínica de la superficie de las partículas.

Los iones de calcio proveen el enlace esencial en los mecanismos de unión entre moléculas, como se representa en la figura 2.

Figura 2. **Formación fosfato de calcio**



Fuente: CHEN, James. *Manual del Azúcar de Caña*. p. 180.

Smith (2000) señala que el mecanismo de floculación de enlace completamente nuevo ha sido comúnmente aceptado, este nuevo mecanismo hace uso de moléculas de gran peso molecular, que son capaces de unirse a las partículas de impurezas cercanas. Crees y colaboradores han confirmado que los polímeros con pesos moleculares por debajo de 10^6 actúan sólo como estabilizadores. Asimismo, demuestran que los pesos moleculares deben ser del orden de 10^7 para obtener una buena clarificación.

La dosificación normal de los polímeros para efectuar la clarificación es de 2 a 4 partes por millón con respecto al peso del jugo según Chen. El único polímero floculante encontrado y aceptado ha sido el polímero lineal sintético basado en el ácido acrílico y la acrilamida.

2.2.7. Mecanismo de floculación

Chen (1985) describe que dos tipos de floculación han sido descritos, una causada por la precipitación, *in situ*, de un precipitado inorgánico, la otra causada por la atadura de una cadena larga de un polímero. Estos dos mecanismos son diferentes y emplean diferentes interacciones fisicoquímicas. Si un floculante de poliacrilamida es agregado al jugo mezclado sin tratar, por ser este una suspensión estable, el efecto de floculación no puede ser detectado a simple vista. De cualquier manera, alguna floculación habrá ocurrido por la atadura de partículas simples de impurezas a lugares activos en la molécula del polímero.

Una mejora dramática en el efecto del polímero de poliacrilamida se basa, en el hecho de haber floculado las partículas en suspensión del jugo por el tratamiento convencional de cal y calor. En este caso cada lugar activo en el polímero puede ligarse a un grupo de partículas.

2.2.7.1. Floculación primaria

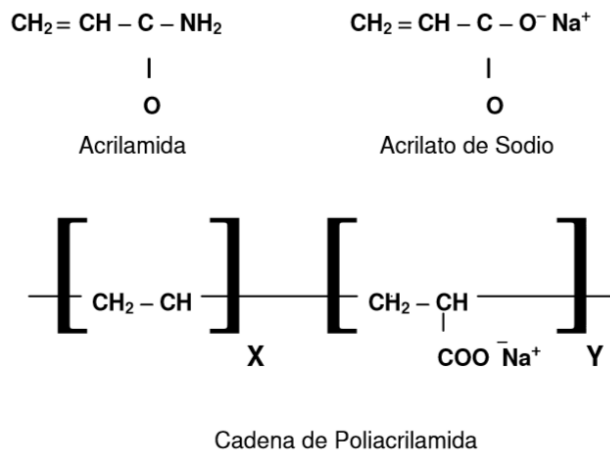
La floculación primaria envuelve la agregación de partículas simples en libre suspensión en el jugo o licor en grumos que son la terminación de los flóculos primarios. Estos flóculos primarios pueden contener cualquier cantidad desde 10 a 10⁴ unidades de partículas por flóculo, dependiendo del proceso de floculación primaria que ha sido empleado. En clarificación de jugo por ejemplo, el número de partículas por flóculo primario aumenta a un valor máximo, lo cual incrementa la cantidad de fosfato de calcio precipitado. En un sistema de clarificación de licor tipo Talofloc se utiliza el sacarato de cal para acelerar la formación del flóculo primario.

2.2.7.2. Floculación secundaria

El proceso de floculación secundaria se inicia al agregar un agente floculante aniónico que aglomera a las partículas generadas en la floculación primaria, con esto se logra el incremento de las partículas. Los flóculos suelen tener diámetros diversos, incluso tan grandes como un centímetro de diámetro.

La floculación secundaria es un eslabonamiento de los flóculos primarios descritos. En dimensiones moleculares, el tamaño completo de los flóculos primarios sugiere que únicamente los polímeros lineales muy largos son capaces de realizar un eslabonamiento, y no es una sorpresa por lo tanto, que los polímeros activos sean todos los de peso molecular extremadamente grande.

Figura 3. **Poliacrilamida hidrolizada**



Fuente: CHEN, James. *Manual del Azúcar de Caña*. p. 180.

2.2.8. Clarificación Talofloc¹

El propósito de clarificación Talofloc consiste en eliminar color y turbidez del licor de azúcar crudo mediante una técnica de separación por flotación/floculación. La clarificación por flotación-floculación tipo Talofloc implica la utilización de diversas operaciones para lograr su objetivo de remover color y turbidez del licor de azúcar. Posee diversas características que lo diferencian de los métodos tradicionales de clarificación por sedimentación, la principal es que se adiciona aire en el licor para lograr que los flóculos formados en segunda floculación floten y se logren arrastrar posteriormente con la espuma.

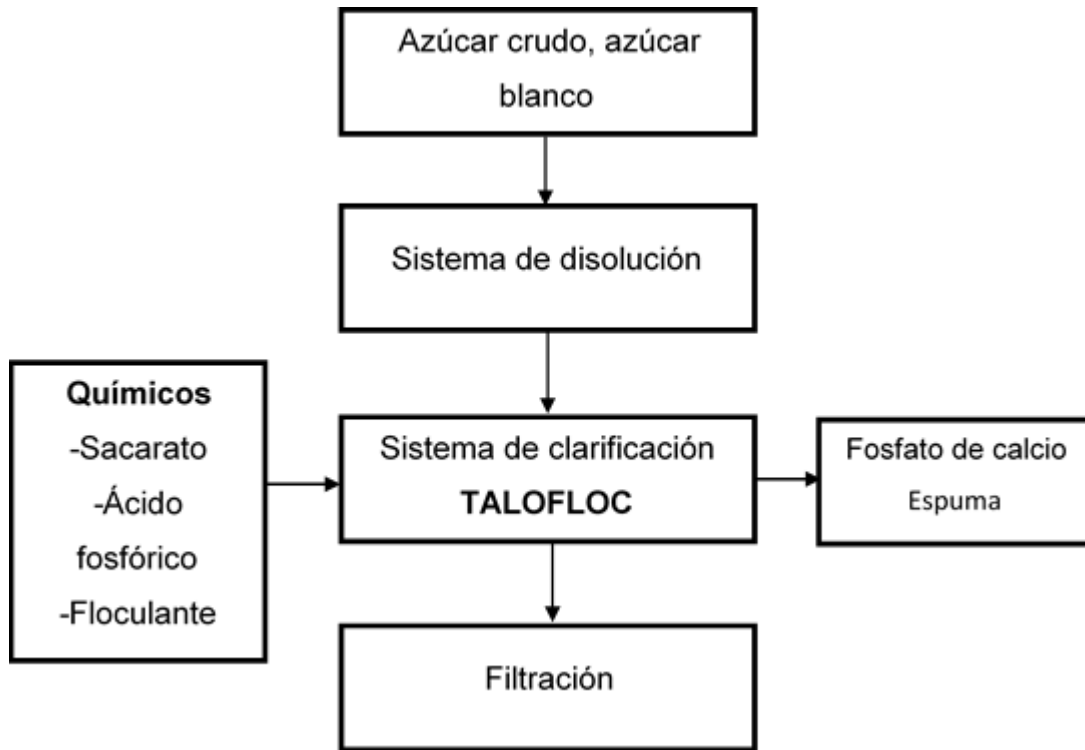
Tate & Lyle (2010) indica que el éxito de la operación depende de:

- La absorción de la materia coloidal suspendida por el fosfato de calcio, formado de la reacción entre el ácido fosfórico y el sacarato de calcio.
- Buena aireación de los flóculos primarios de fosfato de calcio y formación de flóculos aireados mayores por la adición del floculante TALOFLOTE.
- Tiempo suficiente en el clarificador para permitir que los flóculos aireados se separen del licor, así como para permitir la remoción controlada de la espuma.

Al igual que todos los procesos continuos, para el buen funcionamiento de la operación es necesario mantener condiciones estables en el clarificador. Si se presentan amplias fluctuaciones en el Brix, temperatura y tasas de flujo de licor, estas resultan en una clarificación deficiente.

¹ TATE & LYLE, Operating Manual Talofloc Clarification, 2010.

Figura 4. Diagrama de bloques sistema de clarificación Talofloc

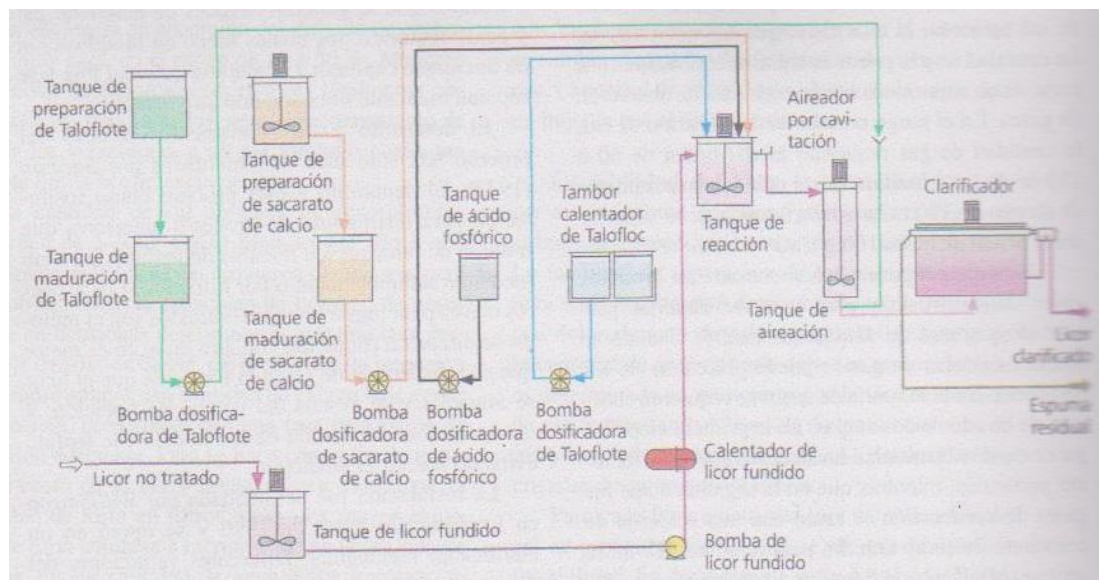


Fuente: TATE & LYLE, *Design Manual Talofloc Clarification*. p. 7.

La figura 4 presenta un diagrama de bloques de la operación de clarificación Talofloc, en este se muestran los agentes involucrados en la operación. Rein (2012), menciona que el subproducto de la clarificación es la espuma generada, esta necesita un tratamiento adicional de extracción de azúcar debido a que posee un alto contenido de sacarosa de aproximadamente 65 grados Brix. La calidad del licor clarificado en términos de color y turbidez entregado por el sistema de clarificación, es esencial para no alterar los procesos siguientes de filtración y cristalización. El color del licor final es determinante para la determinación de la proporción de licor y jarabe a utilizar en el proceso de cristalización.

La figura 5 representa el diagrama de flujo del proceso de fosflotación tipo Talofloc. El punto de adición de cada uno de los químicos está determinada por la función que realizarán durante el proceso de clarificación.

Figura 5. **Diagrama de flujo del proceso de fosflotación Talofloc**



Fuente: REIN, *Ingeniería de la caña de azúcar*, p. 596.

Chou (2010) refiere que la eficiencia de decoloración por fosflotación es usualmente inferior a lo que es posible lograr con la carbonatación. Sin embargo puede ser incrementada en más del 60 por ciento a través del uso de floculantes catiónicos y precipitantes de colores similares. Estos productos químicos son costosos, pero las dosis se pueden regular para ajustarse a la decoloración requerida. Es una práctica común contar con un filtro de lecho profundo luego del clarificador de fosfatación para capturar cualquier arrastre de flóculos antes de la filtración a presión y/o decoloración. De lo contrario se hace necesaria una filtración de rectificación después de la fosfatación para eliminar la turbidez de otro modo puede contaminar el medio de decoloración.

2.2.8.1. Tanque de reacción

El licor de azúcar fundido es alimentado al tanque buffer, donde se mezcla constantemente por un agitador. El licor es bombeado a un tanque de reacción, a través de un transmisor de flujo y un intercambiador de calor. El transmisor de flujo envía una señal, proporcional al flujo, al controlador PID del sistema de control, donde es comparado con el punto de ajuste de flujo. La válvula de flujo de licor se ajusta automáticamente para dar la tasa de flujo establecida.

La temperatura del licor de salida del intercambiador de calor es medida por un termómetro de resistencia, el cual envía una señal, proporcional a la temperatura, al controlador PID del sistema de control donde es comparada con el punto de ajuste de temperatura. La válvula de control de flujo de vapor se ajusta para que la temperatura de licor sea la adecuada para el proceso, usualmente 85 grados Celsius (185 grados Fahrenheit). El ácido fosfórico es dosificado sobre el tanque de reacción por medio de la bomba dosificadora, cuya velocidad es controlada automáticamente como una proporción directa de la posición de la dosificación y la tasa de dosificación de flujo de licor.

El pH en el tanque de reacción es medido por el transmisor de pH, el cual envía una señal, proporcional al pH, al controlador PID del sistema de control, donde es comparado con el punto de ajuste de pH. Doherty (1999) menciona que la reacción de ácido fosfórico y cal produce un precipitado de fosfato de calcio (floculo primario) que adsorbe material coloidal de color en su superficie. Se agrega un agente decolorante en el tanque de reacción para obtener una decoloración adicional. La velocidad de las bombas de agente decolorante debe ser controladas automáticamente como una proporción directa del punto de ajuste de tasa de flujo y dosificación. Los agitadores del tanque de reacción se aseguran de que los químicos se mezclen por completo.

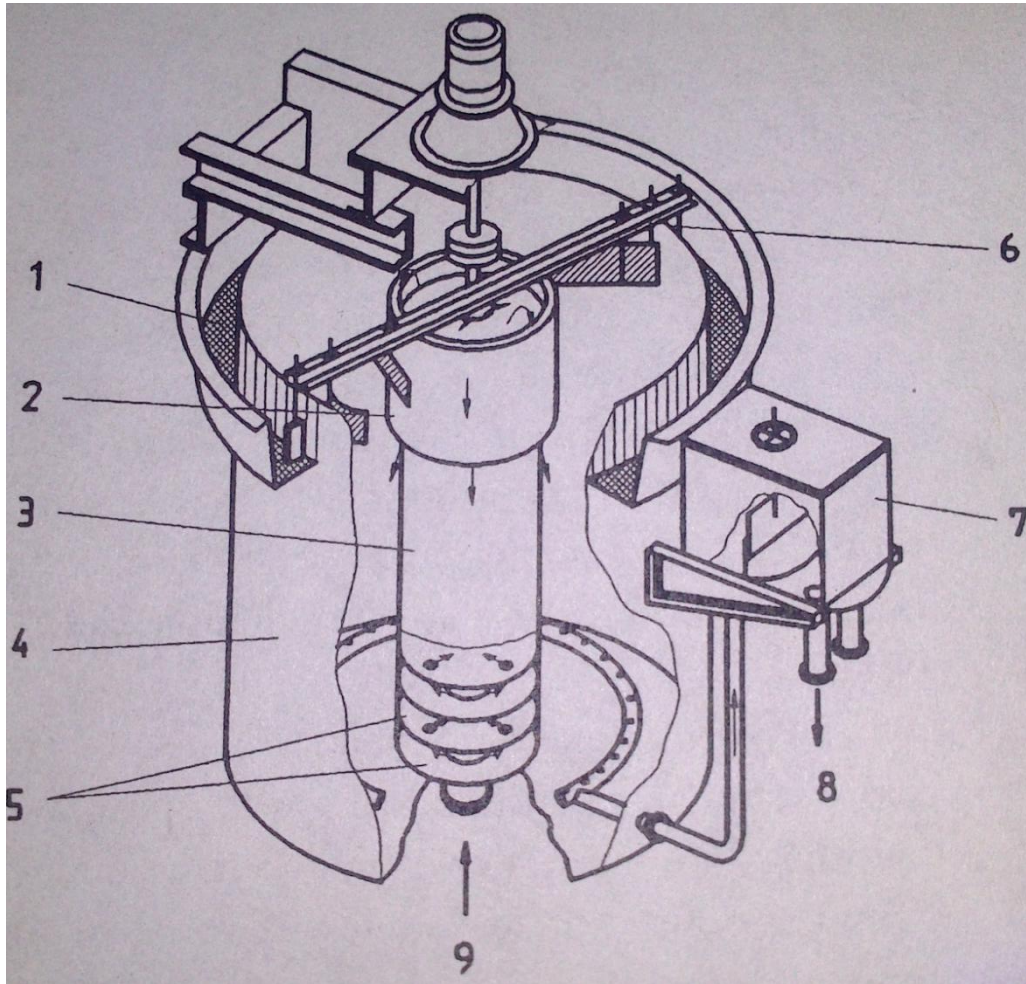
El licor pasa entonces al compartimiento de aireación, donde es aireado mediante aireadores de cavitación. Desde el compartimiento de cavitación el licor corre por gravedad a los dos clarificadores. El floculante es dosificado en línea entre el compartimiento de aireación y los clarificadores mediante la bomba de floculante. La velocidad de la bomba de floculación es controlada como una fracción proporcional del punto de ajuste de la dosificación y la tasa de flujo de licor.

2.2.8.2. Tanque de flotación

El floculante es agitado suavemente dentro del licor por el movimiento generado por el desplazamiento entre el tanque de reacción y el flotador. Los flóculos primarios y el aire finamente dispersado se coagulan mediante la solución de floculación para formar grandes flóculos que flotan a la superficie del clarificador formando una capa de espuma. La espuma se retira de la superficie mediante un rastrillo que la descarga en el canal receptor de espuma.

El licor clarificado pasa entonces desde el clarificador a través de un sistema de anillo al filtro de separación. La posición establecida para el filtro controla el nivel del líquido en el clarificador, mientras la velocidad del rastrillo de espuma controla la remoción de la misma. Estos mecanismos permiten controlar la profundidad de la capa de espuma y la consistencia de la misma. Desde el filtro de separación, el licor clarificado pasa a la etapa de filtración.

Figura 6. Clarificador tipo Talofloc



1. Canal receptor de espuma; 2. Manga; 3. Cámara de floculación. 4. Cámara de flotación; 5. Tabiques (baffles) de mezclado; 6. Raspador de espuma; 7. Caja de desborde; 8. Salida de licor clarificado; 9. Alimentación de licor.

Fuente: VAN DER POEL, P. W. *Sugar Technology*, p. 596.

2.2.8.3. Químicos usados en el proceso

Uno de los aspectos claves para un buen desempeño de clarificación es la obtención y preparación de químicos de buena calidad. Smith (2000) refiere que los químicos utilizados en la fosflotación incluyen:

- Ácido fosfórico, grado alimenticio, 85 por ciento H_3PO_4 suministrado en estado líquido.
- Agente decolorante, suministrado en estado líquido.
- Sacarato de calcio, preparado a partir de licor sin tratar y lechada de cal.
- Solución floculante, preparada a partir de polvo y agua fría de buena calidad.

El ácido fosfórico y el decolorante no requieren ninguna preparación pues son suministrados en contenedores listos para usar. Los niveles de estos tanques químicos deben revisarse regularmente y completarse cuando sea necesario. El sacarato de calcio y la solución de floculante requieren que un operario prepare lotes frescos de cada químico a tiempo para llenar el tanque de almacenamiento. Es necesario tener precaución al decidir cuándo iniciar la preparación de cada químico, pues requieren formas diferentes de maduración.

2.3. Color en el azúcar refinado

Chen (1985) señala que la sacarosa pura es incolora, pero puede parecer coloreada debida a la inclusión de pequeñas cantidades de material coloreado en el azúcar. Color es el término genérico utilizado para describir una amplia gama de componentes que contribuyen al color en el azúcar. Muchos de estos compuestos son complejos y no son fáciles de cuantificar de manera que el color es medido como el efecto total de todos los colorantes sobre la

absorbancia de la luz. Esto no es completamente satisfactorio debido a que diferentes componentes colorantes se comportan de manera diferente en los diversos procesos y operaciones de decoloración.

Chou (2000) indica que la remoción de color es la función más importante de la refinería. El color de azúcar crudo y la especificación de color del producto azúcar blanco generalmente dictan que procesos deben incorporarse en una refinería de azúcar de caña. El origen, la formación y la respuesta de los diferentes componentes de color a los procesos de decoloración son entonces los aspectos más importantes a considerar. Al final lo trascendental son las moléculas colorantes que se incorporan al azúcar en tanto que, aquellos colorantes que permanecen en el licor madre y que no llegan al producto en medida alguna, ofrecerán una trascendencia menor.

2.3.1. La química de la remoción del color

Con el incremento en la demanda de los clientes en azúcar de mayor calidad, los ingenios y refinерías se han visto forzados a producir azúcar de menor color a un costo más efectivo. Un número de métodos y productos químicos tradicionales y nuevos están disponibles para lograr este objetivo.

2.3.2. Tipos de color

Extensivas investigaciones internacionales han sido desarrolladas para la caracterización del color del azúcar. Son reconocidos cuatro tipos de colores presentes en el azúcar: pigmentos de la planta, melanoidinas, caramelos y degradación alcalina productos de fructosa (ADF). Los últimos tres son pigmentos producidos en los procesos de la fábrica.

2.3.2.1. Pigmentos de la caña de azúcar

Honig (1982) señala que los pigmentos de la caña de azúcar son principalmente fenólicos y flavonoides, que corresponden casi a dos tercios del color en el azúcar crudo. Los fenoles son generalmente incoloros, pero se oxidan o reaccionan con aminas o hierro para formar colorantes durante el proceso. Los flavonoides son poli fenoles que existen en la planta de caña y sufren reacciones enzimáticas de oscurecimiento. Los pigmentos de la planta tienden a tener de bajo a mediano peso molecular ($PM \leq 1000$), pero son altamente ionizados, particularmente a altos valores de pH. Poseen altos valores indicadores, pero son pobremente removidos en la refinería, pero son agregados en gran medida al cristal de sacarosa.

2.3.2.2. Melanoidinas

Riffer (1998) refiere que las melanoidinas son pigmentos producidos en la fábrica que son resultantes de reacciones de tipo Maillard entre amino ácidos con azúcares reductores (oscurecimiento no enzimático). Son únicamente producidas con la aplicación de calor a condiciones de alto Brix y baja pureza, también pueden formarse con exposición de poco calor en período extenso. Presentan una carga ligeramente negativa a un pH neutral, pero son positivas en condiciones ácidas.

2.3.2.3. Caramelos

Son productos de degradación de la sacarosa por efectos de calor, con altos pesos moleculares que incrementan con el tiempo y la temperatura como resultado de un incremento de la polimerización. Son ligeramente cargados y no son sensibles a variaciones de pH.

2.3.2.4. Degradación alcalina, productos de la sacarosa (ADF)

Carpenter y Roberts (1976) son de opinión que estos productos son formados como su nombre lo sugiere, de una descomposición térmica principalmente de fructosa, y de glucosa en menor proporción, bajo condiciones alcalinas. Los productos de la reacción son de coloración café y de naturaleza ácida, que conducen a la inversión del azúcar y a una posterior formación de color. Los mecanismos de formación son inciertos, pero las aminos se conocen estar involucradas. Estos compuestos poseen carga neutra y de mediano a alto peso molecular.

2.3.2.5. No azúcares en la caña que pueden desarrollar un color

Kennedy y Smith (1976) se refieren a que existe gran cantidad de no-azúcares incoloros en la caña de azúcar que al combinarse o reaccionar con otras sustancias puede formar materias colorantes. Se pueden clasificar en:

- Polifenoles: los polifenoles de la caña de azúcar reaccionan con el hierro y el oxígeno para dar compuestos de color oscuro, especialmente en soluciones alcalinas. Entre ellos están incluidos el tanino, derivado del ácido protocaténico, los hidroxilos fenólicos de la antocianina en la corteza, y de la sacaretina en la fibra de la caña.
- Además, las huminas y melanoidinas de la caña también contienen hidroxilos fenólicos. Todos estos polifenoles se oscurecen en contacto con el aire y en soluciones alcalinas, y forman compuestos de color muy oscuro con los iones férricos.

2.3.2.6. Precursores de color

Son compuestos, que, mientras no son propiamente coloreados, propician reacciones que forman color en el proceso. En este grupo se incluyen aminoácidos, simples compuestos fenólicos, y el 5-hidroxi-2 metil furfural (HMF), este último es formado por descomposición ácida de la fructosa.

2.3.3. Efecto de ionización y pH

El grado de ionización de los agentes colorantes indeseados es crítico para la determinación de la eficiencia de remoción por un proceso en particular. Uno de los factores más significativos que afectan la ionización es el pH de la solución. Riffer (1988) declara que, a un pH de 7,2, los caramelos están 99,7 por ciento ionizados mientras que los flavonoides están 0,6 por ciento ionizados. En contraste, los fenoles tienen un grado de ionización de 66 por ciento a un pH de 9,7. El pH del licor también afecta en el tamaño y forma de los polímeros de alto peso molecular, influenciando en la efectividad de los procesos subsiguientes de remoción del color.

Es un hecho que el color del azúcar depende de gran parte del pH de la solución. Esto se debe al diferente color que tienen algunas sustancias a diversas acideces y alcalinidades, siendo la materia colorante, en este caso, un indicador natural del pH. En general, “el color es más claro en las soluciones ácidas que en las alcalinas; esto fue observado en diversas investigaciones y procesos de decoloración.”²

²REIN, P. Ingeniería de la caña de azúcar. p. 532.

2.3.4. Efecto de la polaridad y pH

La polaridad es una propiedad de las cargas parciales que son inducidas a extremos opuestos de la molécula por los arreglos y distintas electronegatividades de los átomos.

Esta propiedad, puede ser extrapolada para los grupos funcionales de moléculas grandes. Smith et al (1981) estudió las propiedades de las características poliméricas de los colorantes de la caña de azúcar. Su estudio está resumido en la tabla III, que sirve para determinar las propiedades de los colorantes y establecer que tipos de colorantes presenta una cierta caña.

Tabla III. **Propiedades de los colorantes de caña de azúcar**

Propiedad	Monomérico	Intermedio	Polimérico
Composición	Principalmente flavonoides	Colorantes producidos en fábrica, ej. ADF	Colorantes producidos en fábrica, ej. Caramelos, melanoidinas
Peso molecular (PM)	≤1000	1000-2500	≥2500
Ion	Neutral a bajo pH	Catiónico a pH inferior a 5, aniónico a pH superior a 6	Catiónico a pH inferior a 5, aniónico a pH superior a 6
Polaridad	Apolar	Intermedio	Polar
Valor Indicador (IV)	5 – 40 Sensible	3 – 4 Intermedio	1 – 2 Insensible

Fuente: Davis SB, *The chemistry of color removal*.

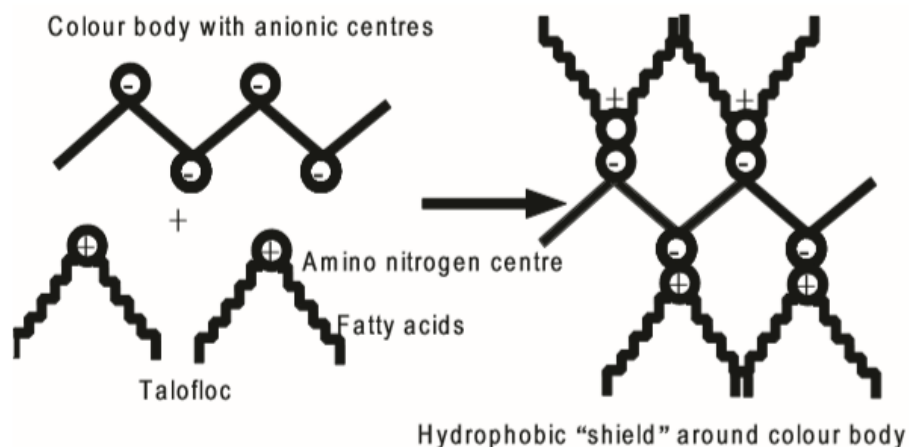
Chen (1985) menciona que la cantidad de colorantes presentes en la caña dependen del lugar, clima y altura de plantación, madurez y época de corte.

2.3.5. Precipitantes de color y floculantes

La utilización de agentes floculantes se debe a la inestabilidad de los agentes no azúcares contenidos en el licor de azúcar. Bennet (1971), menciona que los precipitantes de color deben de tener tres propiedades para una remoción de color efectiva:

- Un centro fuertemente básico (catiónico) que puede fijarse a centros débilmente ácidos (aniónico) en las moléculas colorantes. Este centro básico es normalmente un grupo amino nitrogenado. Este alivio de precipitación se incrementa con la carga aniónica en el color de la molécula.
- Una cadena larga o un hidrocarburo cíclico, frecuentemente con un componente de ácido graso, que es hidrofóbico.
- Un balance entre los dos compuestos anteriores de tal manera que el precipitado se disperse de buena manera en soluciones de azúcar.

Figura 7. Reacción de Talofloc con el colorante



Fuente: Davis, SB. *The Chemistry of color removal.*

Estas partículas son muy pequeñas para ser removidas fácilmente por filtración convencional, pero son efectivamente buscados por los precipitados de la carbonatación y fosfatación.

Bennet (1971) menciona tres etapas de la decoloración por el proceso Talofloc:

- El surfactante catiónico reacciona con el colorante aniónico para formar un precipitado insoluble.
- Este precipitado es buscado por el fosfato de calcio para formar un floc primario.
- La adición de un polímero aniónico de poliacrilamida entonces incrementa el tamaño efectivo de los flóculos estableciendo enlaces (floculación secundaria).

Bennett (1971) menciona que las cadenas de los ácidos grasos reducen la tensión superficial entre el aire y el licor en la superficie de las partículas floculadas, y mejoran la adherencia de las burbujas a los precipitados durante la aireación. Por lo tanto, Talofloc brinda un beneficio mayor con fosfatación que con carbonatación. Existe una dosificación óptima de precipitante que no debe ser excedida para una máxima efectividad. Bennet et.al. (1971) brinda una extensa investigación con respecto al número de químicos empleados en la decoloración, entre estos se incluye: carbón activado, carbón de huesos, resinas iónicas, carbón en polvo.

El rango de la dosificación óptima es relativamente estrecho, y es recomendado que se realice un chequeo periódico en las fábricas para asegurar el mejor desempeño y la utilización eficiente de químicos relativamente caros.

2.3.6. Comparación entre procesos de remoción de color

Los procesos de remoción de color utilizados en la industria azucarera poseen una gran cantidad de áreas coincidentes y diferentes. La tabla IV detalla las fortalezas y debilidades de cada proceso, para la remoción de los agentes colorantes. Cada bloque de esta tabla indica si un cierto proceso remueve un colorante de manera adecuada o inadecuada.

Tabla IV. **Efecto de los procesos de decoloración en los tipos de colorante**

Proceso	Fenoles	Flavonoides	Melanoides	Caramelos	Productos ADF	Precusores de color
Carbonatación	√ !	X	√	√	!	
Sulfatación	√	√	√			√
Fosfatación	X	X	√	√	√	
Precipitantes de color			√	√	√	
Decolorantes oxidativos	√	√				√
Carbón activado	√	√	√	√	X	
Intercambio iónico	X	X	√	X	√	

√ - Bien removido X – pobremente removido! – Formado en el proceso

Fuente: DAVIS, *The chemistry of color removal*.

Sawhney (1997) refiere que más refinerías utilizan carbonatación en lugar de fosfatación o cualquiera de sus variaciones. Con frecuencia se asume que las pérdidas en las refinerías que utilizan carbonatación son menores, debido esencialmente al desendulzado de la espuma que se hace necesario con la fosfatación. Es también importante controlar a la fosfatación mas cuidadosamente, pues una operación incorrecta puede resultar en arrastres de partículas floc con el licor clarificado.

2.3.7. Cambios de color en la práctica³

El principal parámetro de calidad en el azúcar refinado es el color, debido a su importancia es necesario, conocer su desarrollo y evitarlo. La configuración de la refinería implicará la cantidad de reactivos a utilizar para lograr el color final deseado en el rango de 15 a 35 unidades ICUMSA. Existen varios parámetros que pueden afectar el color del azúcar en el proceso, los mismos que se describirán a continuación:

2.3.7.1. Oscurecimiento del licor de azúcar

Los estabilizadores del pH tienen un importante efecto sobre los cambios de color. Las sustancias húmicas café rojizas pueden quedar ocluidas en los cristales de azúcar, particularmente a valores bajos de pH.

2.3.7.2. Color en el azúcar refinado

Casi todo el azúcar como los productos intermedios del azúcar están coloreados, ya sea de amarillo, ámbar o café rojizo oscuro. La cantidad y naturaleza de estos colores dependen del tipo de la materia colorante original y de las reacciones que ocurren durante el proceso. Los diversos factores que intervienen se originan en los crudos, las condiciones de la operación (pH, temperatura, otras), los adsorbentes que se usan en el proceso, y en otras variables semejantes.

³ Tomado de DAVIS, The chemistry of color removal.

2.3.7.3. Desarrollo del color en el procesamiento de azúcar de caña

Cierto número de los mismos factores están involucrados en el oscurecimiento del jugo de la caña y del azúcar refinado. Se aplican en las operaciones de refinación. En este proceso se lava el azúcar crudo y se funde; esto es denominado licor afinado, se alcaliza, filtra y decolora; el último proceso es la cristalización y en esta etapa puede formarse color durante la concentración por ebullición. Parte de este color puede estar contenida en la película líquida que rodea el cristal, ya que, el cristal de sacarosa puede absorber ciertas impurezas coloridas tales como el caramelo coloidal y la melanoidina.

Sin perder de vista que uno de los principales objetivos del proceso de refinación es la eliminación del color, se puede decir que la eliminación de este no es siempre práctica. Por otra parte, como durante el proceso hay una formación de color, las condiciones deben ser cuidadosamente controladas para evitar un desarrollo excesivo del color.

3. DISEÑO METODOLÓGICO

3.1. Variables

Como resultado de la investigación, recopilación y estudio de la información presente en libros y en artículos de revistas científicas sobre los factores que influyen en el proceso de clarificación, se determinaron las variables independientes que permanecieron constantes y las que fueron modificadas para medir su efecto sobre las variables dependientes o de respuesta.

- Variables de control

Tabla V. **Variables de control en la estación de clarificación**

No.	Variable	Dimensional	Factor potencial de diseño		Factores perturbadores	
			Constante	Variable	Controlables	Ruido
1	Temperatura	°C	X		X	
2	Sólidos solubles	°Bx	X		X	
3	Flujo de licor	TSSH	X		X	
4	Dosificación de floculante	ppm		X	X	
5	Dosificación de ácido fosfórico	ppm		X	X	
6	pH tanque de reacción	Adimensional		X	X	
7	Dosificación de decolorante	ppm		X	X	
8	Flujo de espuma	TSSH	X			X
9	Volumen tanque pulmón	gal	X		X	
10	Flujo de jarabe	gpm	X		X	

Fuente: elaboración propia.

- Variables independientes

Tabla VI. **Descripción operacional de las variables independientes**

No.	Variable	Dimensional	Descripción
1	Dosificación de ácido fosfórico	ppm	Cantidad de ácido fosfórico añadido al tanque de reacción calculado en función de las toneladas de sólido solubles que ingresan al clarificador.
2	Dosificación de floculante	ppm	Cantidad de floculante aniónico añadido al tanque de reacción calculado en función de las toneladas de sólido solubles que ingresan al clarificador.
3	Dosificación de decolorante	ppm	Cantidad de decolorante catiónico añadido al tanque de reacción calculado en función de las toneladas de sólido solubles que ingresan al clarificador.
4	Flujo de Sacarato de cal.	L/h	Volumen de sacarato de cal añadido en el tanque de reacción, para ajustar el pH del licor.

Fuente: elaboración propia.

- Variables dependientes

Tabla VII. **Descripción operacional de las variables dependientes**

No.	Variable	Dimensional
1	Color	UI
2	Turbidez	UI

Fuente: elaboración propia.

- Delimitación del campo de estudio
 - Área: tecnología de alimentos
 - Industria: azucarera
 - Proceso: refinación de azúcar
 - Etapa del proceso: clarificación de licor por fosflotación.
 - Proceso: evaluación del porcentaje de remoción de color y turbidez en el licor utilizando un clarificador tipo Talofloc, identificando las condiciones de operación que cumplan con los parámetros de operación aceptables.
 - Ubicación: la evaluación se realizó en un Ingenio azucarero ubicado en el municipio de Santa Lucía Cotzumalguapa, Escuintla. Las muestras de licor clarificado y azúcar refinado se obtendrán de la refinería ubicada en la planta. Los análisis físicos y químicos serán realizados en el Laboratorio de Control de Calidad del mismo ingenio.
 - Clima: caliente, con una temperatura promedio anual máxima de 35,7 grados Celsius, mínima de 23,0 grados Celsius, y media de 26,9 grados Celsius durante el 2013, según el Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología.

- Recursos humanos disponibles
 - Investigador: Br. Pavel Enrique Roulet Santa Cruz
 - Asesor: Ing. Qco. Carlos Roberto Morales Cuellar
 - Co-asesor: Ing. Juan Pedro Quiñónez Fernández
 - Operadores de la estación de Clarificación
 - Análisis externos: personal laboratorio de control de calidad.

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

En el presente trabajo se usaron las siguientes materias primas, reactivos, insumos, cristalería y equipo, con la finalidad de cumplir con los objetivos de la presente investigación. Estos se detallan a continuación:

- **Materias primas**
 - Azúcar crudo
 - Azúcar refinado
 - Licor de azúcar
 - Sacarato de cal
 - Ácido fosfórico
 - Floculante
 - Decolorante
 - Jarabe de azúcar

- **Reactivos**
 - Agua desmineralizada para uso industrial, agua pura Salvavidas
 - Ácido fosfórico, grado alimenticio
 - Azúcar refinado
 - Licor disuelto
 - Licor clarificado
 - Jarabe

- **Equipo industrial**
 - Clarificador tipo Talofloc
 - Tanque de reacción

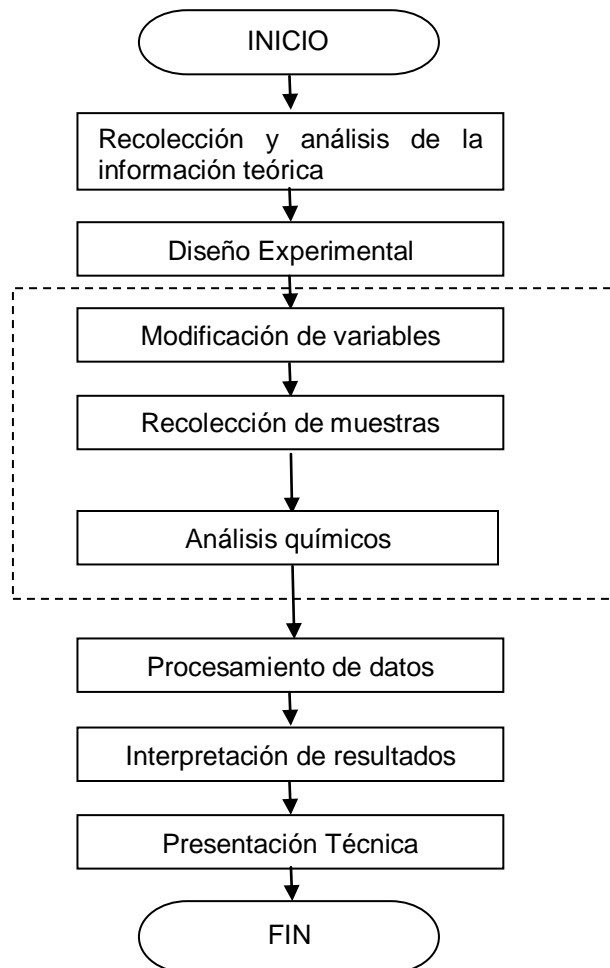
- Equipo de medición
 - Químico
 - Potenciómetro
 - Refractómetro
 - Espectrofotómetro
 - Másico
 - Balanza analítica – resolución 0.1 mg
 - Térmico
 - Termómetro

- Equipo auxiliar
 - Mecánico
 - Bomba de vacío
 - Equipo de filtración al vacío
 - Vidrio
 - *Beacker* – 250 mL
 - Celda espectrofotométrica - 10 mm
 - Celda espectrofotométrica – 50 mm
 - Recipiente de vidrio – 1L
 - Kitasato – 500 mL
 - *Earlenmeyer* – 250 mL
 - Plástico
 - Agitador magnético

3.3. Técnica cuantitativa

Debido a la naturaleza del fenómeno a estudiar, la investigación se desarrolló por medio de técnicas cuantitativas con base en las variables antes descritas. Los parámetros cualitativos adicionales se utilizaron como apoyo en la interpretación del estudio.

Figura 8. Diseño general para la técnica cuantitativa



Fuente: elaboración propia.

3.3.1. Técnicas cuantitativas de análisis

Los análisis fisicoquímicos llevados a cabo fueron los empleados por el laboratorio de control de calidad del ingenio, basados en los métodos aprobados por ICUMSA.

Tabla VIII. Descripción de los métodos cuantitativos de análisis

Nombre	Código ICUMSA	Descripción
Turbidez en licor de azúcar	GS7-21 (2007)	El método se aplica para la determinación de turbidez en licor clarificado, jarabes y jarabes clarificados y es un indicativo de la eficacia del proceso de clarificación.
Color en licor de azúcar	GS7-21 (2007)	El método se aplica para la determinación del color en licor clarificado, jarabes y jarabes clarificados y es un indicativo de la eficacia del proceso de clarificación.

Fuente: ICUMSA. *Libro de Métodos ICUMSA 2007*, p. 338.

3.3.2. Análisis de medición de color

El libro de métodos de ICUMSA 2007, refiere el método actualizado de medición de color en una solución de sacarosa, es aplicable para jugo, licor y jarabe; el análisis se realiza a 420 nanómetros por ser el rango visual de mayor presencia de la sacarosa. En la refinería posee principal importancia el control de la eliminación de color en el licor a lo largo de los procesos decolorantes para poder cristalizar azúcar con un color inferior a las 35 unidades ICUMSA. Para analizar la calidad del licor clarificado y el efecto de la recirculación de jarabe en la estación de clarificación, se analizará el color de la siguiente manera:

- Determinación de color de licor GS2/3 –10 (2007)
 - Pesar $50,0 \pm 0,1$ gramos de licor y agregarles $50,0 \pm 0,1$ gramos de agua en un *beacker* de 250 mililitros.
 - Colocar la solución en una plancha de agitación magnética hasta disolver el azúcar completamente, colocar el *beacker* con la solución en el baño ultrasónico por aproximadamente 3 minutos.
 - Filtrar entre 60 a 80 mililitros de la solución con un filtro de 0,45 micrones; usando la bomba de vacío.
 - Colocar la solución en un baño ultrasónico por aproximadamente 3 minutos.
 - Medir el Brix de la solución filtrada en un refractómetro y anotar.
 - Lavar la celda con la solución y descartar, llenar la celda, leer en el espectrofotómetro y anotar. Anotar el ancho de la celda.
 - Con el Brix de la solución, buscar en la tabla de relación de densidad y concentración de azúcar de anexos, el valor de densidad de la solución en dimensionales gramos por mililitro

El resultado del análisis se determina así:

$$\text{Color ICUMSA} = \frac{\text{Abs} * 100\ 000}{\text{Bx} * \text{AC} * \rho}$$

Donde:

Color ICUMSA= color ICUMSA (UI)

ABS= absorbancia (ABS)

Bx= sólidos solubles (°Bx)

AC= ancho de celda (cm)

ρ = densidad (g/cm³)

3.3.2.1. Remoción de color

La remoción de color del licor es uno de los parámetros de control en la estación de clarificación. Se obtiene a partir de los valores de color del licor disuelto y el licor clarificado, previo y posterior a la clarificación.

$$\% \text{Remoción Color} = \frac{\text{Color}_{\text{licor disuelto}} - \text{Color}_{\text{licor clarificado}}}{\text{Color}_{\text{licor disuelto}}} * 100$$

3.3.3. Análisis de medición de turbidez

El clarificador tipo Talofloc está diseñado para remover en promedio 75 por ciento de turbidez, este parámetro puede establecer la eficiencia del proceso. Por ello es importante su monitoreo y control.

- Determinación de turbidez de licor GS2/3 –18 (2007)
 - Pesar $50,0 \pm 0,1$ gramos de licor y agregarles $50,0 \pm 0,1$ gramos de agua en un *beacker*.
 - Colocar la solución en una plancha de agitación magnética hasta disolver el azúcar completamente, colocar el *beacker* con la solución en el baño ultrasónico por aproximadamente 3 minutos.
 - Medir el Brix de la solución en un refractómetro y anotar como Brix 1.
 - Encender el espectrofotómetro y seleccionar el modo de absorbancia, cambiar la longitud de onda a 420 nanómetros. Y poner a cero el espectrofotómetro con agua filtrada desairada.
 - Lavar la celda con la solución y descartar, llenar la celda, leer en el espectrofotómetro y anotar como absorbancia 1.
 - Filtrar entre 60 a 80 mL de la solución con un filtro de 0,45 micrones; usando la bomba de vacío.
 - Colocar la solución en un baño ultrasónico por aproximadamente 3 minutos.
 - Medir el Brix de la solución filtrada en un refractómetro y anotar como Brix 2.
 - Lavar la celda con la solución y descartar, llenar nuevamente la celda, leer en el espectrofotómetro y anotar como absorbancia 2.

El resultado del análisis se determina así:

$$\text{Color 1 ICUMSA} = \frac{\text{Abs 1} * 100\,000}{\text{Bx 1} * \text{AC} * \rho}$$

$$\text{Color 2 ICUMSA} = \frac{\text{Abs2} * 100\,000}{\text{Bx 2} * \text{AC} * \rho}$$

$$\text{Turbidez} = \text{Color 1 ICUMSA muestra sin filtrar} - \text{Color ICUMSA muestra filtrada}$$

3.3.3.1. Remoción de turbidez

La remoción de turbidez del licor es uno de los parámetros más importantes de control en la estación de clarificación, porque es el indicador de eficiencia del proceso. Se obtiene a partir de los valores de turbidez del licor disuelto y el licor clarificado.

$$\% \text{Remoción Turbidez} = \frac{\text{Turbidez}_{\text{licor disuelto}} - \text{Turbidez}_{\text{licor clarificado}}}{\text{Turbidez}_{\text{licor disuelto}}} * 100$$

3.4. Recolección y ordenamiento de la información

Las muestras de licor disuelto fueron tomadas a la salida del calentador de coraza y tubos, este está situado previo al tanque de reacción. Las muestras de licor clarificado fueron tomadas en la caja de rebalse de los clarificadores. Se controló cada tres horas el avance de proceso, evaluando el porcentaje de remoción de color y turbidez, a su vez se controlaron otros parámetros de operación como el pH del licor clarificado, Brix, flujo de licor, temperatura y volumen del tanque pulmón de licor.

3.4.1. Determinación de remoción de color y turbidez de licor en condiciones de estándar de operación

El sistema automático de clarificación permite realizar cambios en la dosificación de los químicos empleados en esta operación. El flujo de dosificación de sacarato de cal, ácido fosfórico, decolorante y floculante son añadidos en el tanque de reacción en función del flujo de licor.

Tabla IX. **Condiciones de operación estándar**

Químico	Condición (ppm)
Sacarato de Cal (ajuste de pH)	pH= 6,8 - 7,2
Floculante	9 – 12
Decolorante	80 – 100
Ácido fosfórico	275 - 300

Fuente: elaboración propia.

3.4.2. Determinación de remoción de color y turbidez de licor con recirculación de jarabe

La diferencia con las condiciones estándar fue la introducción de una cantidad de jarabe a la salida del calentador de coraza y tubos para que se mezclara con el licor disuelto.

Tabla IX. **Condiciones de operación con recirculación de jarabe**

Químico	Condición (ppm)
Sacarato de Cal (ajuste de pH)	pH= 6,8 - 7,2
Floculante	9 – 12
Decolorante	80 – 100
Ácido fosfórico	275 - 300
Flujo de jarabe (gpm)	35

Fuente: elaboración propia.

3.5. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información

Una vez obtenidos los datos implicados en la clarificación por fosflotación se graficaron los valores para los rangos establecidos en el tiempo de muestreo y de esta manera poder establecer un comportamiento; así se mejora el análisis de los resultados.

3.6. Análisis estadístico

Para la evaluación del porcentaje de remoción de color y turbidez en un clarificador tipo Talofloc, se realizó una prueba de hipótesis para el promedio de dos poblaciones con varianzas desconocidas y diferentes.

3.6.1. Promedio de una muestra

La media aritmética, representa un promedio, de un conjunto finito de datos, representa una suma de todos los valores de la muestra, dividida entre el número de sumandos. Expresada de forma más intuitiva, se puede decir que la media es la cantidad total de la variable, distribuida en partes iguales entre cada observación.

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n a_i}{n} = \frac{a_1 + \dots + a_n}{n}$$

3.6.2. Determinación de errores de muestreo

Para mejorar el análisis de resultados se utilizó el análisis de dispersión de datos debido a que las medidas de dispersión permitieron retractsar la distancia de los valores de la variable a un cierto valor central, permitiendo la identificación de la concentración de los datos en un cierto sector del recorrido de la variable. El término precisión se utiliza para describir qué tan reproducibles son las mediciones; es decir, qué tan semejantes son los resultados con los otros obtenidos exactamente en la misma forma y en las mismas condiciones. Para describir la precisión de un conjunto de datos repetidos se utilizan tres términos muy conocidos: la desviación estándar, la varianza y el coeficiente de variación.

3.6.3. Varianza

Permite identificar la diferencia promedio que hay entre cada uno de los valores respecto de su punto central (media). Este promedio es calculado, elevando cada una de las diferencias al cuadrado, y calculando su promedio o media; y dividiendo este resultado por el número de observaciones que se tengan.

A continuación su forma de cálculo para una muestra:

$$S^2 = \frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{n - 1}$$

3.6.4. Desviación estándar

Esta medida permite determinar el promedio aritmético de fluctuación de los datos respecto de la media. La desviación estándar da como resultado un valor numérico que representa el promedio de diferencia que hay entre los datos y la media. Para calcular la desviación estándar basta con hallar la raíz cuadrada de la varianza, por lo tanto la ecuación es:

$$S = \frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{n - 1} = \sqrt{S^2}$$

3.6.5. Prueba de hipótesis para el promedio de dos poblaciones con varianzas desconocidas y diferentes

Cuando es poco probable que las desviaciones estándar de las poblaciones sean iguales, no es muy apropiado mezclar las desviaciones estándar muestrales para dar una estimación global o conjunto de la desviación estándar. Para contrastar $H_0: \mu_1 = \mu_2$ cuando no puede suponerse que las dos muestras proceden de poblaciones con desviaciones estándar iguales, se calcula el estadístico t y los grados de libertad de la muestra, la forma de su determinación está descrita en la tabla XI.

Tabla XI. **Fórmulas para la prueba de hipótesis para el promedio de dos poblaciones con varianzas desconocidas y diferentes**

Estadístico de prueba	Grados de Libertad
$t = \frac{(\bar{X}_1 - \bar{X}_2)}{\sqrt{\frac{S_1^2}{n_1} + \frac{S_2^2}{n_2}}}$	$\gamma = \frac{\left(\frac{S_1^2}{n_1} + \frac{S_2^2}{n_2}\right)^2}{\left(\frac{S_1^4}{n_1^2(n_1-1)} + \frac{S_2^4}{n_2^2(n_2-1)}\right)^2}$

Fuente: MONTGOMERY, Douglas, C. *Applied statistics and probability for engineers*, p. 257.

4. RESULTADOS

A continuación se presenta el comportamiento de cada uno de los parámetros evaluados en el análisis de la recirculación de jarabe en la estación de clarificación tipo Talofloc en una refinería de azúcar.

Tabla XII. **Promedio de color en el licor disuelto, licor clarificado y jarabe en condiciones estándar y de recirculación**

	Color Licor Disuelto (UI)		Color Licor Clarificado (UI)		Color Jarabe (UI)
	CE	RJ	CE	RJ	RJ
Promedio	351,00	538,00	293,00	481,00	1826,00
Desviación	62,94	106,46	64,58	99,16	227,34
Coefficiente de Variación (%)	17,94	19,80	22,07	20,64	12,45

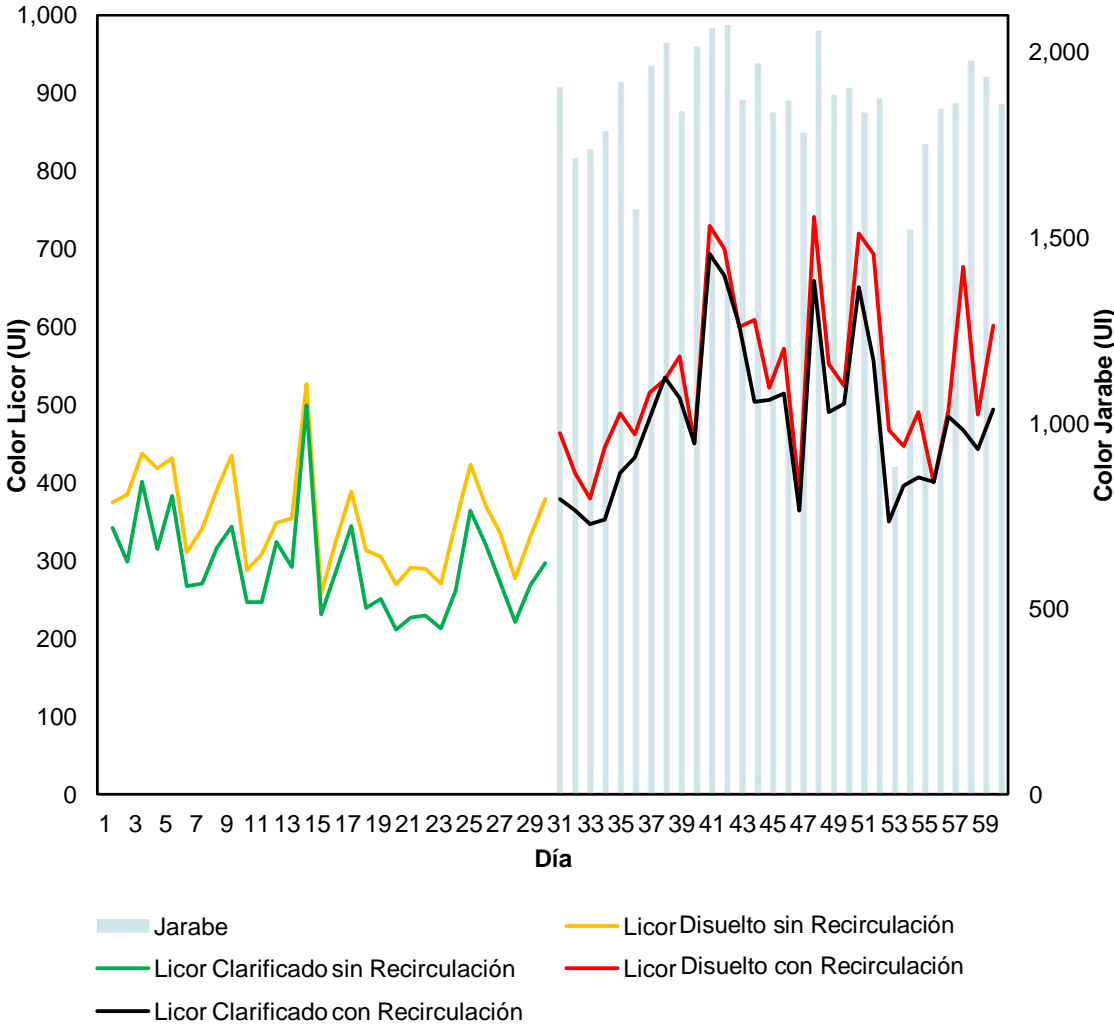
Fuente: elaboración propia.

Tabla XIII. **Promedio de turbidez en el licor disuelto, licor clarificado y jarabe en condiciones estándar y de recirculación**

	Turbidez Licor Disuelto (UI)		Turbidez Licor Clarificado (UI)		Turbidez Jarabe (UI)
	CE	RJ	CE	RJ	RJ
Promedio	197,49	136,7	35,69	33,19	130,32
Desviación	64,65	18,87	10,88	6,74	28,05
Coefficiente de Variación (%)	32,74	13,79	30,47	20,30	21,52

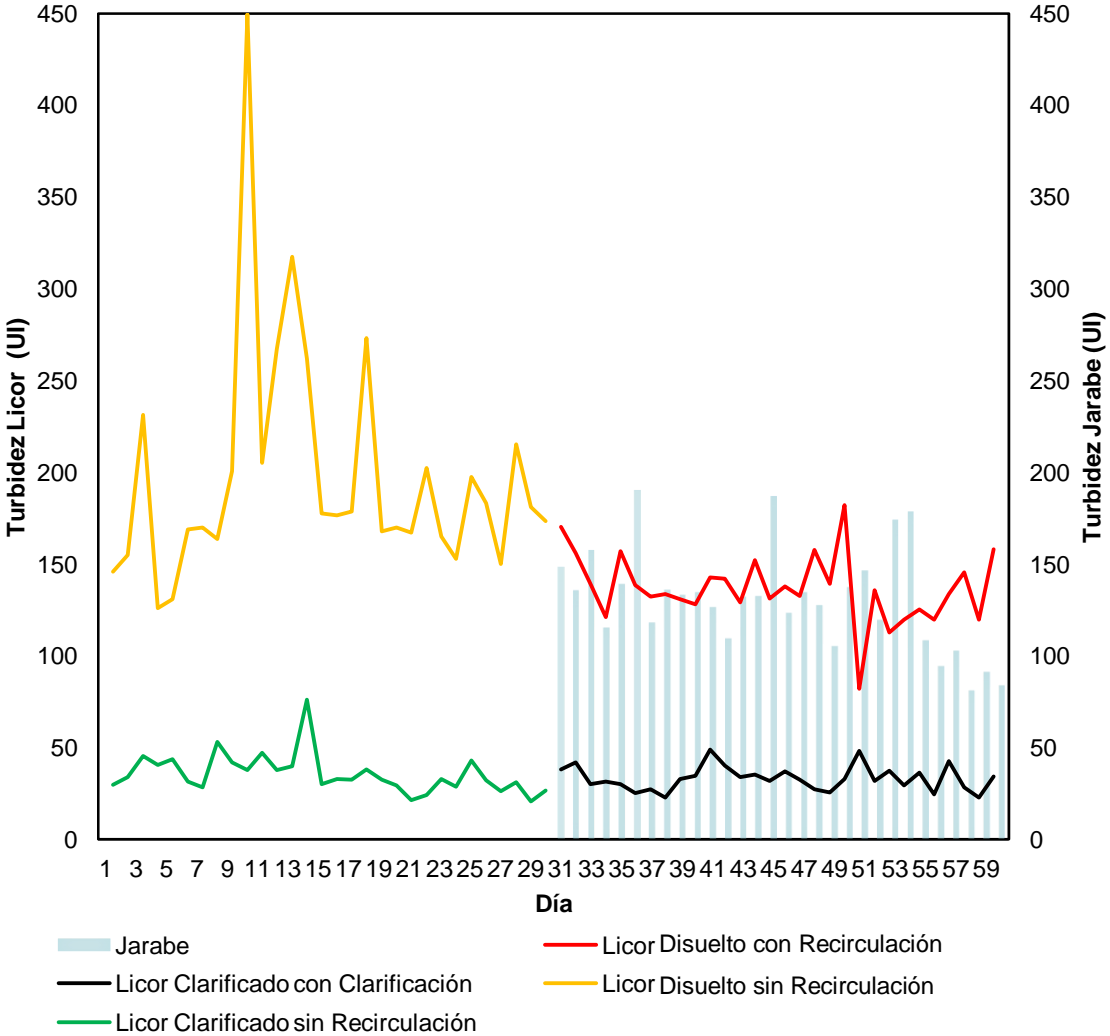
Fuente: elaboración propia.

Figura 9. **Comportamiento del color de licor disuelto, licor clarificado y jarabe**



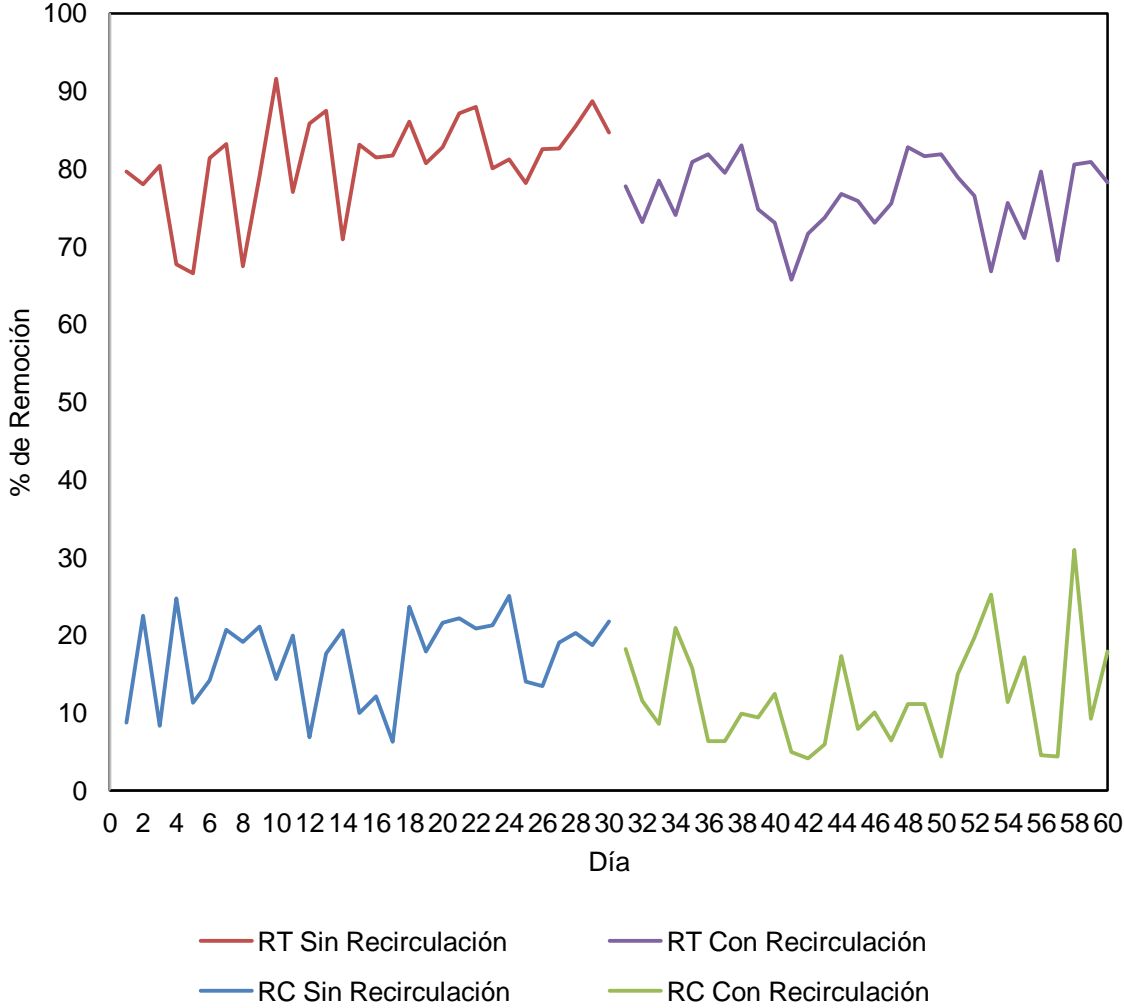
Fuente: elaboración propia.

Figura 10. **Comportamiento de la turbidez de licor disuelto, licor clarificado y jarabe**



Fuente: elaboración propia.

Figura 11. **Comportamiento del porcentaje de remoción de color y turbidez en el licor clarificado**



Fuente: elaboración propia.

Tabla XIV. **Promedio de remoción de color y turbidez en el licor en condiciones estándar y de recirculación**

	Remoción de Turbidez (%)		Remoción de Color (%)	
	CE	RJ	CE	RJ
Promedio	81,00	76,36	17,26	11,93
Desviación	6,19	4,76	5,50	6,68
Coefficiente de Variación (%)	7,64	6,24	31,88	56,00

Fuente: elaboración propia.

Tabla XV. **Prueba de hipótesis para la remoción de color y turbidez**

Análisis	t calculada	t crítica	Decisión
Remoción de color	0,599	1,674	Ho aceptada
Remoción de turbidez	0,492	1,673	Ho aceptada

Fuente: elaboración propia.

5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

El objetivo principal en el presente trabajo de graduación fue la evaluación de los efectos generados por la recirculación de jarabe en un sistema de clarificación tipo Talofloc y su consecuencia en los porcentajes de remoción de color y turbidez en el licor de azúcar. El esquema operativo de simple masa de la refinería, genera una producción de jarabe residual de aproximadamente 30 por ciento en cada *batch* de cristalización. La necesidad de reutilizar de este producto surgió para mantener los niveles de eficiencia en niveles aceptables y evitar su retorno de azúcar a la fábrica.

La refinería dispone de un sistema de purificación de licor por fosflotación, se investigó la posibilidad de utilizarlo para reducir el color y la turbidez del jarabe. Para esto se realizaron seis análisis diarios durante sesenta días de la zafra 2013-2014, treinta de estos previos y treinta durante la recirculación.

El sistema de clarificación tipo Talofloc está diseñado para remover ciertos no-azúcares por fosflotación, utilizando para esto ácido fosfórico y sacarato de cal. El porcentaje de remoción de turbidez puede ser interpretado como el factor principal de eficiencia del clarificador. La utilización de un decolorante catiónico en la clarificación permite remover no-azúcares que no fueron atraídos por la formación del floculo primario con la reacción del ácido y sacarato, más estos si son atraídos por los extremos positivos de la molécula del decolorante.

Para evaluar el desempeño del clarificador en las condiciones estándar y de recirculación de jarabe se controlaron las variables operativas de color, turbidez y porcentaje de remoción de estos materiales.

La figura 9 presenta el comportamiento del color en el licor disuelto, licor clarificado y jarabe. La primera parte de la figura muestra la conducta del color de los licores previo a la recirculación de jarabe, los resultados oscilan entre 300 y 530 UI; y 200 y 450 UI para el licor disuelto y licor clarificado respectivamente. La segunda parte de la figura 9 presenta el comportamiento del color en los licores y la injerencia del jarabe en el incremento significativo de este parámetro para los dos tipos de licor.

El color y las características fisicoquímicas del jarabe, inciden en la configuración de la estación de clarificación. El color del licor disuelto se incrementó en un promedio de 200 UI, complicando la operación normal del clarificador, esto afectó el color de salida del licor clarificado reportando valores de hasta 700 UI, en contraste al promedio presentado previo a la recirculación de jarabe.

La tabla XI presenta los valores promedios de color para el licor disuelto y clarificado previo y durante la recirculación de jarabe. El licor disuelto $351 \pm 62,94$ UI y $538 \pm 106,46$ UI de color anterior y durante la recirculación de jarabe respectivamente. Mientras que el licor clarificado reportó $293 \pm 64,58$ UI y $481 \pm 99,16$ UI de color previo y durante la recirculación de jarabe respectivamente. El incremento de color es notable para ambos licores atribuible al color del jarabe (2000 UI en promedio), a su vez la capacidad de remoción de color del clarificador se ve comprometida, por la necesidad de aumentar el pH de operación, incrementando el consumo de ácido fosfórico y sacarato de cal para la eliminación de impurezas.

A su vez se monitoreó el comportamiento de la turbidez en los tres materiales previamente mencionados. En la figura 10 se presentan dichos comportamientos. Debido a la pureza del azúcar disuelta la recirculación de

jarabe no tuvo injerencia en la turbidez del licor, este parámetro presenta valores inferiores de aproximadamente 75 UI y 15 UI para el licor no clarificado y clarificado respectivamente. Los valores de turbidez reportados para el licor clarificado previo y durante la recirculación de jarabe cumplen con los requisitos de calidad planteados para la estación de clarificación.

La tabla XII presenta los promedios de turbidez para el licor disuelto y clarificado previo y durante la recirculación de jarabe. El licor disuelto reportó $197 \pm 64,65$ UI y $136 \pm 18,87$ UI de turbidez anterior y durante la recirculación de jarabe respectivamente. Mientras que el licor clarificado reportó $35 \pm 10,88$ UI y $33 \pm 6,74$ UI de turbidez previo y durante la recirculación de jarabe respectivamente.

Las figura 11 ilustra el comportamiento del porcentaje de remoción de color y turbidez en la estación de clarificación. Ambos parámetros muestran una disminución durante la recirculación de jarabe. El clarificador tipo Talofloc está diseñado para remover entre 50 y 100 por ciento de turbidez en el licor, los resultados obtenidos se mantuvieron en este rango. Para el caso de la remoción de color el clarificador tipo Talofloc trabaja en el rango de 10 a 50 por ciento, los resultados promedios tanto previo como durante la recirculación de jarabe cumplieron con esta condición.

La tabla XIII reúne los resultados promedio de remoción de color y turbidez en el licor clarificado. El porcentaje de remoción de turbidez reportó valores de $81,00 \pm 6,19$ por ciento y $76,36 \pm 4,76$ por ciento cuando el clarificador trabajó en condiciones estándar y de recirculación de jarabe respectivamente. Por su parte el porcentaje de remoción de color reportó valores de $17,26 \pm 5,50$ por ciento y $11,93 \pm 6,68$ por ciento. Ambos presentan disminuciones significativos en sus resultados para evaluar el efecto de la

recirculación de jarabe en términos de remoción de color y turbidez se realizó una prueba de hipótesis para diferencia de medias. Cabe señalar que el parámetro de remoción de turbidez mayor a 75 por ciento se cumplió para ambas situaciones, en cuanto, para la remoción de color ningún caso alcanzó el parámetro de 25 por ciento establecido para la estación.

Para evaluar los efectos operativos de la recirculación de jarabe en la clarificación, se realizó una prueba de hipótesis de diferencia de medias, los resultados están representados en la tabla XIV, comprobándose que con un 95 por ciento de nivel de confianza la recirculación de jarabe en el clarificador tipo Talofloc generó una disminución en el porcentaje de remoción de color y turbidez menor o igual al 5 por ciento. Esta reducción en la remoción de color y turbidez conlleva una modificación en las operaciones de filtración y cristalización subsiguientes.

Posterior a la recirculación de jarabe, en la estación de filtración se incrementó la dosificación de carbón activado para reducir el color adicional aportado por la mezcla del jarabe con el licor, lo que generó un aumento en el consumo de tierra de diatomeas para no afectar la filtrabilidad. A su vez, en la estación de cristalización, debido a un mayor color del licor final, la proporción de mezcla en cada templa tuvo que ser modificada, reduciendo la proporción de jarabe habitual.

Se puede inferir que la utilización del sistema de clarificación tipo Talofloc como una opción para purificar la mezcla de jarabe con licor es inviable operacionalmente debido a la reducción de efectividad producida en el sistema.

CONCLUSIONES

1. El porcentaje de remoción de color fue de $17,26 \pm 5,50$ %, cuando el clarificador trabajó en condiciones estándar.
2. El porcentaje de remoción de turbidez fue de $81,00 \pm 6,19$ %, cuando el clarificador trabajó en condiciones estándar.
3. El porcentaje de remoción de color fue de $11,93 \pm 6,68$ %, cuando el clarificador trabajó con recirculación de jarabe.
4. El porcentaje de remoción de turbidez fue de $76,36 \pm 4,76$ %, cuando el clarificador trabajó con recirculación de jarabe.
5. Con un 95 por ciento de confianza, la recirculación de jarabe en la estación de clarificación genera una disminución en la remoción de color y turbidez menor o igual al 5 por ciento.
6. La recirculación de jarabe en la estación de clarificación no afecta la turbidez del licor clarificado.

RECOMENDACIONES

1. El estudio de las otras variables involucradas en el sistema de clarificación tipo Talofloc sería de utilidad para obtener más parámetros de operación de esta área.
2. Utilizar un método alternativo de purificación de jarabe para no interferir con la operación del sistema de clarificación tipo Talofloc.
3. Determinar la pérdida de sacarosa generada al disminuir el pH de operación en la clarificación, para evaluar la posibilidad de clarificar efectivamente disminuyendo la dosificación de sacarato de cal.
4. Colocar un agitador en el tanque almacenador de jarabe para lograr la unificación del color y así evitar variaciones significativas que afectan el desempeño del clarificador si se decide recircularlo.
5. Se debe reducir el tiempo de residencia del licor en el tanque de flotación para impedir un desprendimiento de partículas adheridas a la espuma.

BIBLIOGRAFÍA

1. BENNETT, MC. Preliminary results on the use of Talofloc in sugar refining. *Sugar Technology*. 1971, p. 52-59, núm.4.
2. BUSHONG, James H.; SARIR, Emmanuel M. y JIMENEZ, Ana María. Mejoramiento del Proceso de Clarificación por Fosflotación en la producción de azúcar refino: Aumento de la eficiencia de producción y mejoras en la calidad del producto final. *Revista Tecnicaña*. 2010, p. 14-17, núm. 125.
3. CARPENTER, FG; ROBERTS, EJ. Colourant formation under refining conditions. *Sugar Technology*. 1976, p. 106-115, núm. 45.
4. CASTILLO MAURICIO, Danilo Romero. *Análisis de los efectos de los procesos de sulfitación de jugo y meladura sobre el color del azúcar producido, para el proceso de disolución en una refinería*. Trabajo de Graduación de Ing. Química, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2012, 144 p.
5. CHEN, James. *Manual del azúcar de caña: para fabricantes de azúcar de caña y químicos especializados*. México: Limusa, 1985. 1194 p.
6. CHEN, W. A study of color development in plantation white sugar manufacture. *Sugar Technology*. 1976, p. 1564-1568, núm. 14.

7. CHOU, Chung. *Handbook of sugar refining: a manual for desing and operation of sugar refining facilities*. New Orleans: John Wiley & Sons, Inc., 2000. 744 p. ISBN: 0-471-18357-1
8. ————. Pros and Cons of various decolorization processes for production of refined sugar, *International Sugar Journal*. 2010, p. 87-92, núm. 487.
9. COGUANOR. *Azúcar refinado*. COGUANOR NGO 34 034. Guatemala: COGUANOR, 1987.
10. Cooperativa de Produtores de Cana, Açucar e Álcool do Estado de São Paulo LTDA. *Manual de Controle Químico da Fabricação de Açúcar*. Piracicaba: COPERSUCAR, 2001. 57 p.
11. DAVIS, S. B., The chemistry of color removal. *South African Sugar Journal*. 2008, p. 131-138, núm. 176.
12. DOHERTY, W. y EDYE, L. An overview on the chemistry of clarification of cane sugar juice. *Australian Sugar Journal*.1999, p. 42-44, núm. 124.
13. DOHERTY, W.; GREENWOOD, D.; PILASKY, D.; WRIGHT, P. The effect of liming conditions in juice clarification. *Australian Sugar Journal*.2002, p. 98-104, núm. 156.
14. EGGLESTONG. G.; PEPPERMAN, A. B.; CLARKE, M. Degradation of sucrose across the Talo™ clarification process. *Sugar Technology*.1996, p. 45-48, núm.100.

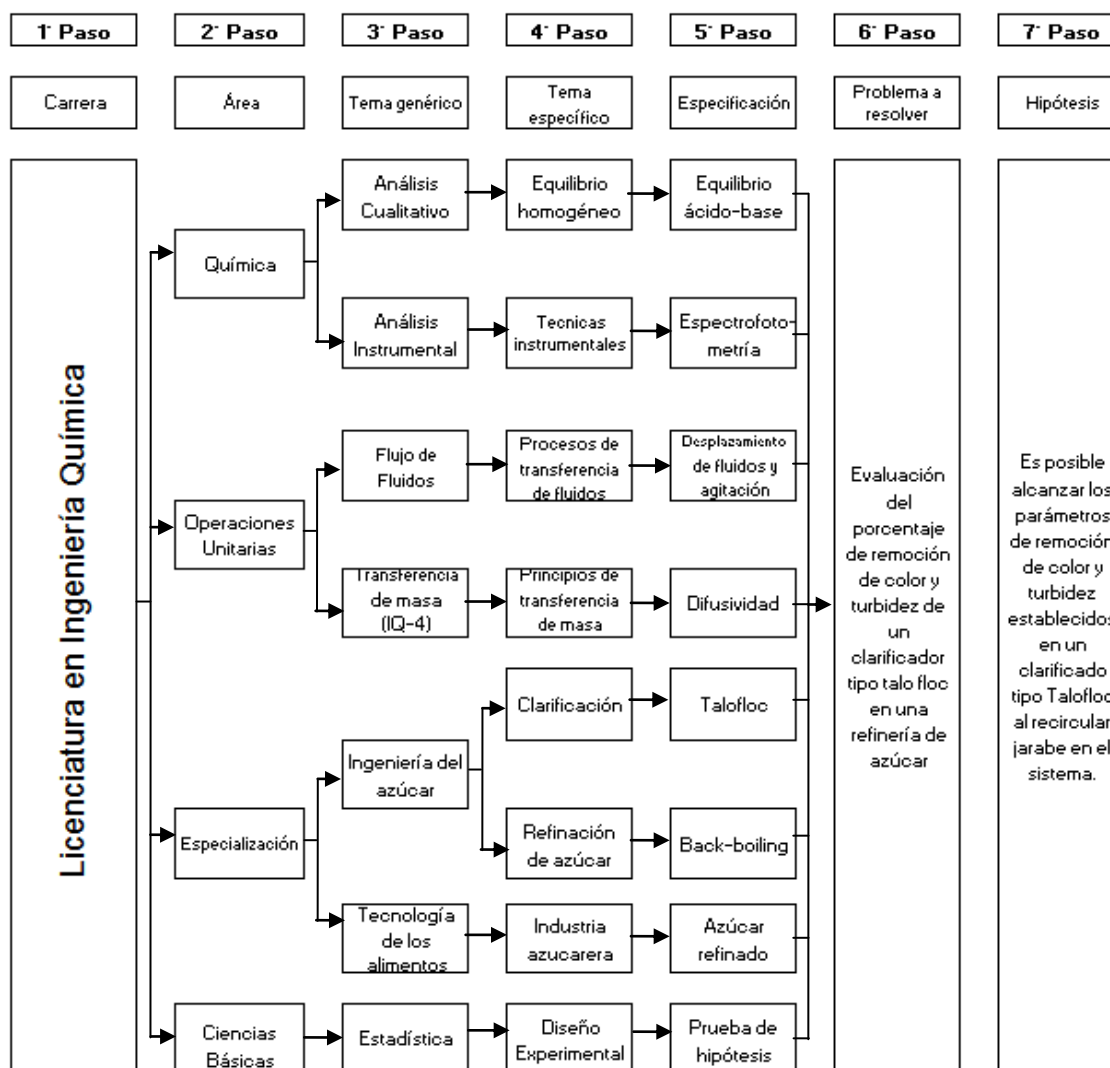
15. GIL ZAPATA, Nicolas Javier. Consideraciones acerca del desempeño operacional de las estaciones de clarificación y filtración. *Técnicaña*. 2008, p. 60-61, núm. 36.
16. HONIG, Pieter. *Principios de Tecnología Azucarera: Purificación*. México, D.F.: Compañía Editorial Continental, 1982. 730 p.
17. HUGOT, E. *Handbook of cane sugar engineering*. 3a. ed. Amsterdam: Elsevier Science Publishers B.V., 1986. 1184 p. ISBN 0-444-42438-5.
18. International Commission for Uniform Methods of Sugar Analysis, *Libro de métodos (2007)*. Berlin: Verlag Dr. Albert Bartens KG, 2007. 388 p. ISBN 978-3-87040-573-1.
19. JANSEN, Terry. Raw sugar quality from a refiner's perspective. *South African Sugar Journal*. 2009, p. 56-59, núm. 182.
20. KENNEDY, A. M y SMITH, J. Color in refineries. *Process Sugar Industry Technology*. 1976, p. 156-160, núm. 35.
21. LYLE, Oliver. *Technology for sugar refinery workers*. 3a. ed. Londres: Redwood Press Limited, 1970. 662 p. ISBN 412-09820-2
22. MATIC, M. Aspects of flotation clarification of mixed juice. *South African Sugar Journal*. 1969, p. 29-36, núm. 22.

23. MONTGOMERY, Douglas. *Applied statistics and probability for engineers*. 3a. ed. Arizona: John Wiley & Sons, Inc., 2003, 976 p. ISBN 0-471-20454-4
24. REIN, Peter. *Ingeniería de la caña de azúcar*. Berlin: Verlag Dr. Albert Bartens KG, 2012. 880 p. ISBN 978-3-87040-142-9
25. RIFFER, R. The nature of colorants in sugarcane and cane sugar manufacture. En: CLARKE, M.A. *Chemistry and processing of sugarbeet and sugarcane*. Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 1998. p. 186-207.
26. RUNGASS, F. M y SHEPARD, G. S. Some aspects of flocculant use in the phosphatation process *South African Sugar Journal*. 1977, p. 32-34, núm. 22.
27. SANDERS, R. R. A decade of refining at Noosberg. *South African Sugar Journal*. 1992, p. 123-129, núm. 74.
28. SAWHNEY, D. The Indian Sugar Industry: a complex, yet increasingly prominent force in the world sugar scene. *International Sugar Journal*. 1997, p. 78-89, núm. 400.
29. SMITH, I.A.; SCHUMANN, G. T.; WALTHER, D. C. Some developments in flotation clarification. *South African Sugar Journal*. 2000, p. 78-81, núm. 114.

30. STEINDL, R. J. y DOHERTY, W. O. S. Syrup clarification for plantation white sugar to meet new quality standards. *South African Sugar Journal*. 2005, p. 131-138, núm. 78.
31. TATE & LYLE. *Operating Manual Talofloc Clarification*. Inglaterra: Tate & Lyle, 2010. 120 p.
32. ————. *Design Manual Talofloc Clarification*. Inglaterra: Tate & Lyle, 2012. 40 p.
33. TROTT. *Color in sugarcane*. Inglaterra: Thombsburry, 1988. 147 p.
34. VAN DER POEL, P. W.; Schiweck, H. y Schwartz, T. *Sugar Technology, Beet and Cane Sugar Manufacture*. Berlin: Verlag Dr. Albert Bartens KG, 1998. 1 119 p. ISBN: 3-87040-065-X
35. VAZ, Claudio; Stamile Solares, Sergio M. y da Silva, José Oswaldo. *Clarificación de meladura por flotación*. Brasil: ENGENHO NOVO Tecnología Ltda., 1978. 14 p.
36. WALPOLE, Ronald E. *Probabilidad y estadística para ingenieros*. 6a. ed. México: Prentice-Hall Hispanoamericana, 1999. 752 p. ISBN 970-17-0264-6

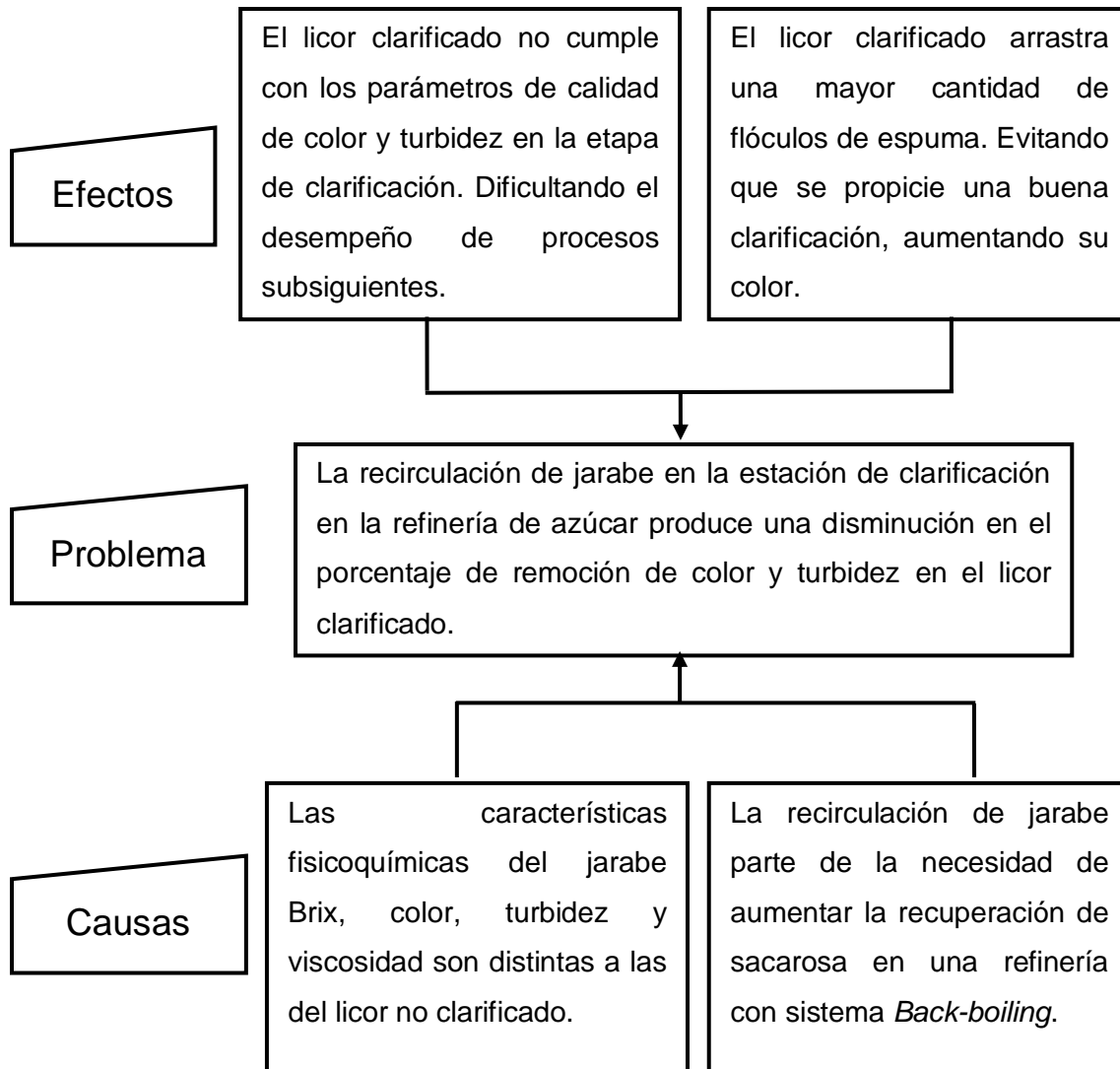
APÉNDICES

Apéndice 1. Diagrama de requisitos académicos



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. Árbol de problemas



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 3. **Resultados promedio de color, turbidez y pH de licor disuelto y clarificado en condiciones estándar**

Fecha	Licor Disuelto			Licor Clarificado			Remoción de Color (%)	Remoción de Turbidez (%)
	Color	Turbidez	pH	Color	Turbidez	pH		
09/01/2014	375	146	6,29	342	30	6,93	8,70	79,62
10/01/2014	384	155	6,44	298	34	6,88	22,46	78,02
11/01/2014	437	231	6,49	401	45	7,00	08,28	80,37
12/01/2014	419	126	6,36	315	41	6,97	24,74	67,72
13/01/2014	432	131	6,61	383	44	6,86	11,30	66,50
14/01/2014	311	169	6,62	267	32	6,87	14,14	81,33
15/01/2014	341	170	6,39	270	29	6,89	20,71	83,21
16/01/2014	391	164	6,49	316	53	6,83	19,11	67,47
17/01/2014	435	201	6,35	343	42	7,03	21,05	79,09
18/01/2014	288	450	6,54	246	38	6,98	14,33	91,59
19/01/2014	308	205	6,53	246	47	6,91	19,97	76,95
20/01/2014	348	267	6,31	324	38	7,01	06,87	85,84
21/01/2014	354	318	6,48	292	40	6,98	17,65	87,41
22/01/2014	527	262	6,64	500	76	6,92	20,56	70,90
24/01/2014	257	178	6,22	231	30	6,94	09,99	83,06
26/01/2014	325	176	6,24	286	33	6,75	12,10	81,43
27/01/2014	389	179	6,17	344	33	7,40	06,30	81,70
28/01/2014	313	273	6,17	239	38	6,65	23,63	86,03
29/01/2014	305	168	6,13	251	32	7,10	17,85	80,71
30/01/2014	270	170	6,37	212	29	7,17	21,56	82,77
31/01/2014	291	167	6,55	227	21	6,85	22,13	87,15
01/02/2014	289	202	6,24	229	24	6,99	20,83	87,98
02/02/2014	270	165	6,40	213	33	7,11	21,26	80,02
03/02/2014	349	153	6,40	262	29	6,88	25,02	81,16
04/02/2014	423	197	6,14	364	43	6,92	14,00	78,17
05/02/2014	371	183	6,24	321	32	6,87	13,46	82,49
06/02/2014	335	150	6,12	271	26	6,78	19,03	82,58
07/02/2014	277	215	6,24	221	31	6,96	20,27	85,48
08/02/2014	331	181	6,24	269	21	7,00	18,67	88,65
09/02/2014	379	173	6,36	296	27	6,85	21,74	84,62

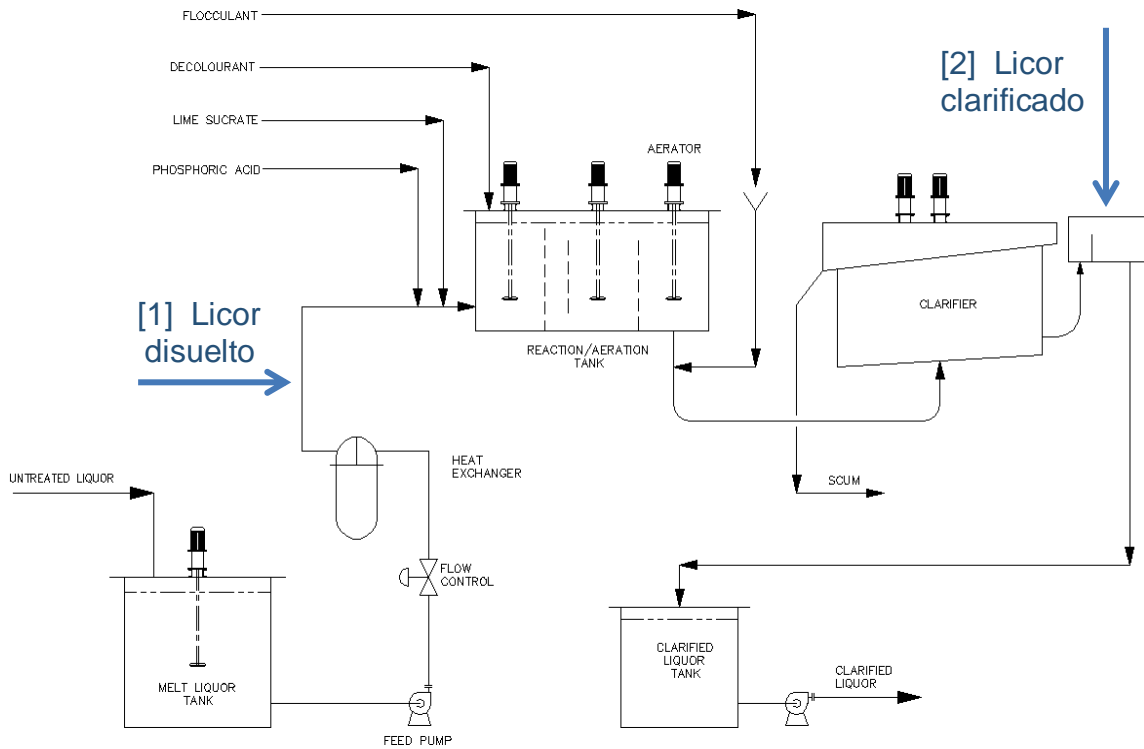
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 4. **Resultados promedio de color, turbidez y pH de licor disuelto y clarificado con recirculación de jarabe**

Fecha	Licor Disuelto			Licor Clarificado			Remoción de Color	Remoción de Turbidez
	Color	Turbidez	pH	Color	Turbidez	pH		
12/02/2014	464	170	6,23	379	38	6,95	18,21	77,69
13/02/2014	411	156	6,24	364	42	6,92	11,50	73,10
14/02/2014	379	139	6,17	347	30	6,71	8,55	78,45
15/02/2014	446	121	6,15	352	31	6,47	20,94	74,00
16/02/2014	489	157	6,02	412	30	6,61	15,74	80,88
17/02/2014	462	139	6,19	432	25	6,85	6,36	81,85
18/02/2014	515	132	6,22	483	27	6,99	6,38	79,43
19/02/2014	532	134	6,18	535	23	6,80	9,89	82,97
20/02/2014	562	131	6,16	509	33	6,82	9,42	74,73
21/02/2014	452	128	6,23	451	35	6,81	12,43	73,04
22/02/2014	729	143	6,19	693	49	6,87	4,96	65,73
23/02/2014	700	142	6,06	666	40	6,83	4,15	71,67
24/02/2014	600	129	6,12	603	34	6,97	5,90	73,66
25/02/2014	609	152	6,20	504	35	6,99	17,32	76,74
26/02/2014	522	131	6,18	506	32	6,88	7,90	75,86
27/02/2014	572	138	6,35	514	37	6,92	10,08	73,06
28/02/2014	389	133	6,39	364	32	6,85	6,46	75,52
01/03/2014	741	158	6,23	659	27	6,89	11,09	82,73
02/03/2014	552	139	6,21	491	26	6,93	11,09	81,58
03/03/2014	525	182	6,18	501	33	6,88	4,39	81,84
04/03/2014	720	82	6,03	651	48	6,88	15,00	78,90
05/03/2014	693	136	6,00	557	32	6,81	19,71	76,51
09/03/2014	468	113	6,29	350	37	6,71	25,17	66,78
10/03/2014	447	120	6,38	397	29	6,86	11,34	75,58
11/03/2014	491	125	6,54	407	36	6,76	17,09	71,05
12/03/2014	400	120	6,37	401	24	6,84	4,50	79,63
13/03/2014	493	134	6,10	485	43	6,77	4,35	68,17
14/03/2014	677	146	6,33	467	28	6,91	30,95	80,49
15/03/2014	488	120	6,16	443	23	6,77	9,23	80,84
16/03/2014	601	158	6,52	494	34	6,95	17,89	78,23

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 5. Metodología de muestreo



Fuente: elaboración propia.

Puntos de muestreo

- La salida del calentador de coraza y tubo es la entrada de licor clarificado.
- El rebalse del clarificador es la salida del licor clarificado.

Frecuencia de muestreo

- Dos análisis por turno de ocho horas.

Horario de muestreo

- Licor no clarificado
 - 03:00 AM, 06:00 AM, 09:00 AM, 12:00 PM, 15:00 PM, 18:00 PM, 21:00 PM, 24:00 AM
- Licor clarificado
 - 04:00 AM, 07:00 AM, 10:00 AM, 13:00 PM, 16:00 PM, 19:00 PM, 22:00 PM, 01:00 AM

ANEXOS

Anexo 1. Valores críticos de t para un contraste de una cola

$\alpha \backslash v$.40	.25	.10	.05	.025	.01	.005	.0025	.001	.0005
1	.325	1.000	3.078	6.314	12.706	31.821	63.657	127.32	318.31	636.62
2	.289	.816	1.886	2.920	4.303	6.965	9.925	14.089	23.326	31.598
3	.277	.765	1.638	2.353	3.182	4.541	5.841	7.453	10.213	12.924
4	.271	.741	1.533	2.132	2.776	3.747	4.604	5.598	7.173	8.610
5	.267	.727	1.476	2.015	2.571	3.365	4.032	4.773	5.893	6.869
6	.265	.718	1.440	1.943	2.447	3.143	3.707	4.317	5.208	5.959
7	.263	.711	1.415	1.895	2.365	2.998	3.499	4.029	4.785	5.408
8	.262	.706	1.397	1.860	2.306	2.896	3.355	3.833	4.501	5.041
9	.261	.703	1.383	1.833	2.262	2.821	3.250	3.690	4.297	4.781
10	.260	.700	1.372	1.812	2.228	2.764	3.169	3.581	4.144	4.587
11	.260	.697	1.363	1.796	2.201	2.718	3.106	3.497	4.025	4.437
12	.259	.695	1.356	1.782	2.179	2.681	3.055	3.428	3.930	4.318
13	.259	.694	1.350	1.771	2.160	2.650	3.012	3.372	3.852	4.221
14	.258	.692	1.345	1.761	2.145	2.624	2.977	3.326	3.787	4.140
15	.258	.691	1.341	1.753	2.131	2.602	2.947	3.286	3.733	4.073
16	.258	.690	1.337	1.746	2.120	2.583	2.921	3.252	3.686	4.015
17	.257	.689	1.333	1.740	2.110	2.567	2.898	3.222	3.646	3.965
18	.257	.688	1.330	1.734	2.101	2.552	2.878	3.197	3.610	3.922
19	.257	.688	1.328	1.729	2.093	2.539	2.861	3.174	3.579	3.883
20	.257	.687	1.325	1.725	2.086	2.528	2.845	3.153	3.552	3.850
21	.257	.686	1.323	1.721	2.080	2.518	2.831	3.135	3.527	3.819
22	.256	.686	1.321	1.717	2.074	2.508	2.819	3.119	3.505	3.792
23	.256	.685	1.319	1.714	2.069	2.500	2.807	3.104	3.485	3.767
24	.256	.685	1.318	1.711	2.064	2.492	2.797	3.091	3.467	3.745
25	.256	.684	1.316	1.708	2.060	2.485	2.787	3.078	3.450	3.725
26	.256	.684	1.315	1.706	2.056	2.479	2.779	3.067	3.435	3.707
27	.256	.684	1.314	1.703	2.052	2.473	2.771	3.057	3.421	3.690
28	.256	.683	1.313	1.701	2.048	2.467	2.763	3.047	3.408	3.674
29	.256	.683	1.311	1.699	2.045	2.462	2.756	3.038	3.396	3.659
30	.256	.683	1.310	1.697	2.042	2.457	2.750	3.030	3.385	3.646
40	.255	.681	1.303	1.684	2.021	2.423	2.704	2.971	3.307	3.551
60	.254	.679	1.296	1.671	2.000	2.390	2.660	2.915	3.232	3.460
120	.254	.677	1.289	1.658	1.980	2.358	2.617	2.860	3.160	3.373
∞	.253	.674	1.282	1.645	1.960	2.326	2.576	2.807	3.090	3.291

v = degrees of freedom.

Fuente: MONTGOMERY, Douglas. *Applied statistics and probability for engineers*. p. 656.

Anexo 2. **Tabla Conversión grados Brix-densidad en soluciones de azúcar a 20 °C**

Porcentagem de sacarose em peso (1)	Massa específica a 20°C (g/ml) (2)	Densidade relat. a 20°/20°C (3)	Porcentagem de sacarose em peso (Brix) (1)	Massa específica a 20°C (g/ml) (2)	Densidade relat. a 20°C/20°C (3)
64.0	1.30927	1.31297	66.0	1.32142	1.32516
.1	988	359	.1	203	577
.2	1.31048	418	.2	264	638
.3	108	479	.3	325	699
.4	169	540	.4	385	759
.5	229	600	.5	446	820
.6	290	661	.6	509	884
.7	350	723	.7	570	945
.8	412	784	.8	632	1.33007
.9	473	845	.9	693	068
65.0	1.31533	1.31905	67.0	1.32754	1.33129
.1	594	966	.1	816	192
.2	655	1.32088	.2	878	254
.3	716	089	.3	1.32939	1.33315
.4	777	150	.4	1.33001	377
.5	837	210	.5	062	438
.6	898	271	.6	124	500
.7	959	332	.7	186	562
.8	1.32019	393	.8	248	625
.9	081	455	.9	309	686

Fuente: COPERSUCAR, *Manual de Controle Químico da Fabricação de Açúcar*.p. 43