



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

**ELABORACIÓN DEL PERFIL DE COLOR DE AZÚCAR REFINO, EN LA ESTACIÓN DE
CENTRÍFUGAS DE LA REFINERÍA DE AZÚCAR DEL INGENIO LA UNIÓN S.A.**

Juan Diego Regalado Reyes

Asesorado por la Inga. Claudia María Barrientos

Guatemala, mayo de 2013

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ELABORACIÓN DEL PERFIL DE COLOR DE AZÚCAR REFINO, EN LA ESTACIÓN DE
CENTRÍFUGAS DE LA REFINERÍA DE AZÚCAR DEL INGENIO LA UNIÓN S.A.**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

JUAN DIEGO REGALADO REYES

ASESORADO POR LA INGA. CLAUDIA MARÍA BARRIENTOS

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO

GUATEMALA, MAYO DE 2013

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE LA JUNTA DIRECTIVA

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

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Otto Raúl De León De Paz
EXAMINADOR	Ing. Federico Guillermo Salazar Rodriguez
EXAMINADOR	Ing. Carlos Salvador Wong Davi
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

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

ELABORACIÓN DEL PERFIL DE COLOR DE AZÚCAR REFINO, EN LA ESTACIÓN DE CENTRÍFUGAS DE LA REFINERÍA DE AZÚCAR DEL INGENIO LA UNIÓN S.A.

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha del 29 de agosto de 2012.



Juan Diego Regalado Reyes

Guatemala, 25 de Enero de 2013

Ing. Victor Monzón
Director de Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería, USAC
Presente.

Por medio de la presente informo a usted que procedí a revisar el informe final de trabajo de graduación del estudiante Juan Diego Regalado Reyes, cuyo título es: **“ELABORACIÓN DEL PERFIL DE COLOR DE AZÚCAR REFINO EN LA ESTACIÓN DE CENTRÍFUGAS DE LA REFINERÍA DE AZÚCAR DEL INGENIO LA UNION, S.A.”** el cual encuentro satisfactorio, y doy por aprobado para continuar con los trámites que correspondientes.

Cabe mencionar que las soluciones planteadas en este trabajo, pronto se procederán a implementar en nuestra organización debido al importante aporte que constituyen para nuestros procesos.

Sin otro particular, me es grato suscribirme de usted.

Atentamente,



Claudia María Barrientos
cbarrientos@launion.com.gt





Guatemala, 01 de marzo de 2013
 Ref. EI.Q.TG-IF.011.2013

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

Estimado Ingeniero Monzón:

Como consta en el Acta TG-050-2012-IF 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: **Juan Diego Regalado Reyes**

Identificado con número de carné: **2006-11072**

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:

ELABORACIÓN DEL PERFIL DE COLOR DE AZÚCAR REFINO EN LA ESTACIÓN DE CENTRÍFUGAS DE LA REFINERÍA DE AZÚCAR DEL INGENIO LA UNIÓN, S.A.

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por la Ingeniera Química: **Claudia María Barrientos**.

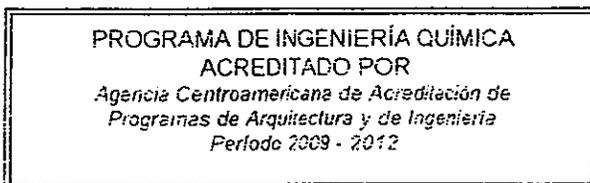
Habiendo encontrado el referido informe final del trabajo de graduación **SATISFACTORIO**, se autoriza al estudiante, proceder con los trámites requeridos de acuerdo a las normas y procedimientos establecidos por la Facultad para su autorización e impresión.

"ID Y ENSEÑAR A TODOS"

Ing. Adolfo Narciso Gramajo Antonio
 COORDINADOR DE TERNA
 Tribunal de Revisión
 Trabajo de Graduación



C.c.: archivo



ACAAI

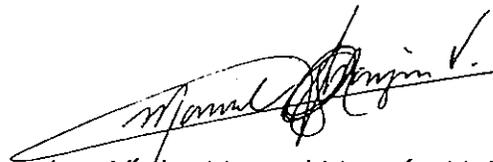
Agencia Centroamericana de Acreditación de Programas de Arquitectura y de Ingeniería



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

Ref.EIQ.TG.107.2013

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, **JUAN DIEGO REGALADO REYES** titulado: "ELABORACIÓN DEL PERFIL DE COLOR DE AZÚCAR REFINO, EN LA ESTACIÓN DE CENTRÍFUGAS DE LA REFINERÍA DE AZÚCAR DEL INGENIO LA UNIÓN S.A." 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, mayo 2013

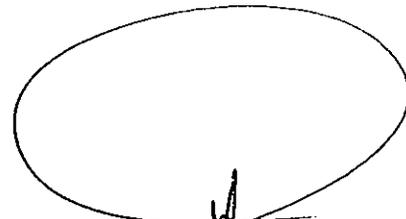
Cc: Archivo
VMMV/ale



DTG. 314 .2013

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al Trabajo de Graduación titulado: **ELABORACIÓN DEL PERFIL DE COLOR DE AZÚCAR REFINO, EN LA ESTACIÓN DE CENTRÍFUGAS DE LA REFINERÍA DE AZÚCAR DEL INGENIO LA UNIÓN S.A.**, presentado por el estudiante universitario **Juan Diego Regalado Reyes**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
Decano

Guatemala, 7 de mayo de 2013

/gdech



ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Porque nada podemos si no viene de él.
- Mis padres** Julio Elmer Regalado y Claudia Dinora Reyes. Por ser ejemplos de perseverancia y responsabilidad, pilares de fortaleza y cimientos de mi vida. Este logro es nuestro.
- Mis hermanos** Josué, Romeo y Emmanuel Regalado. Por ser ejemplos de perseverancia y trabajo.
- Mi novia** Katherine Cisneros. Por aparecer, creer en mí y convertirse en un noble amor y fuerte apoyo.

AGRADECIMIENTOS A:

Dios	Por no abandonarme y darme fuerzas a lo largo del camino de la vida.
Mis padres	Julio Regalado y Claudia Reyes. Por su esfuerzo y sacrificio por nuestra familia.
Mis hermanos	Josué, Romeo y Emmanuel Regalado. Por su apoyo y consejo a lo largo de estos años.
Mi primo	Walter Hernández. Por su solidaridad y aprecio para conmigo y mi familia.
Mis amigos	Javier Alejandro Muralles, Danilo Castillo, David Eugenio Torres. Por demostrar que aún en contra de la corriente se puede salir adelante.
Mis compañeros	Por compartir este camino y mostrarme su solidaridad.
Inga. Claudia Barrientos	Gracias por su apoyo y asesoría.
Ingenio La Unión y sus colaboradores	Gracias por permitirme llevar a cabo este proyecto.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	IX
GLOSARIO	XI
RESUMEN	XV
OBJETIVOS/HIPÓTESIS	XVII
INTRODUCCIÓN	XIX
1. ANTECEDENTES	1
2. MARCO TEÓRICO	5
2.1. Aspectos generales del proceso de refinería de azúcar	5
2.1.1. Disolución	6
2.1.2. Clarificación	6
2.1.3. Filtración	7
2.1.4. Cristalización	8
2.1.5. Centrifugación	8
2.1.6. Secado y enfriado	9
2.1.7. Tamiz vibratorio ROTEX y control de peso	10
2.1.8. Almacenamiento en silo	11
2.1.9. Envasado de sacos y jumbos	11
2.2. Aspectos generales de la centrífuga	12
2.2.1. Definición de la centrífuga	12
2.2.2. Funcionamiento de la centrífuga	13
2.2.3. Descripción de centrífugas batch	14
2.2.4. Centrífugas instaladas en la estación	17

2.2.4.1.	Sistema de amortiguadores	17
2.2.4.2.	Cabezal de baleros	18
2.2.4.3.	Centrador de descarga	18
2.2.4.4.	Descargador	18
2.2.4.5.	Disco distribuidor de masa	19
2.2.4.6.	Cono de cierre de descarga	20
2.2.4.7.	Tamiz o tela de trabajo	20
2.2.4.8.	Canasta	20
2.2.4.9.	Unidad de control y convertidor de frecuencia	21
2.2.4.10.	Repuestos	21
2.3.	Aspectos generales de la medición de color	
2.3.1.	Método ICUMSA para la medición de color GS2/3 – 9 (2005)	24
2.3.1.1.	Transmitancia de la solución.....	24
2.3.1.2.	Transmitancia	24
2.3.1.3.	Absorbancia.....	25
2.3.1.4.	Índice de absorbancia	25
2.3.1.5.	Color ICUMSA	25
2.3.1.6.	Principio.....	25
2.3.1.7.	Procedimiento.....	26
2.3.2.	Medidor de color <i>Neltec ColourQ</i>	26
3.	DISEÑO METODOLÓGICO.....	31
3.1.	Variables	31
3.2.	Delimitación de campo de estudio.....	34
3.3.	Recursos humanos disponibles.....	34
3.4.	Recursos materiales disponibles	34
3.4.1.	Equipo y cristalería	35

3.4.2.	Reactivos	35
3.5.	Técnica de investigación cualitativa y cuantitativa	36
3.6.	Recolección y ordenamiento de la información	41
3.7.	Tabulación, ordenamiento y procesamiento de datos	41
3.8.	Análisis estadístico	41
3.9.	Plan de análisis de resultados	42
3.9.1.	Métodos y modelos de análisis	42
3.9.1.1.	Métodos ICUMSA.....	42
3.9.1.2.	Determinación de media para datos de muestreo	43
3.9.1.3.	Determinación de errores de muestreo .	43
3.9.1.3.1.	Varianza	44
3.9.1.3.2.	Desviación estándar	44
4.	RESULTADOS.....	47
4.1.	Perfil de color para cada capacidad de carga de las máquinas centrífugas.....	47
4.2.	Relación entre los datos de color de la medición de color en línea y los datos obtenidos por el laboratorio de gestión de la calidad	51
4.3.	Evaluación de las 4 máquinas centrífugas para determinar cuál presenta menor remoción de color	53
4.4.	Acciones operativas propuestas para casos con medición de color en línea fuera de parámetros de control establecidos	57
4.5.	Influencia de la variación de los lavados en el jarabe obtenido como subproducto de la centrifugación.....	61
5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	65

CONCLUSIONES 71
RECOMENDACIONES 73
BIBLIOGRAFÍA 75
APÉNDICES 77
ANEXOS 85

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Diagrama de carga y descarga de una centrífuga por lote	15
2.	Distribución de carga en una centrífuga con plato distribuidor (izquierda) y distribución de carga en una centrífuga tradicional (derecha).....	19
3.	Partes de las centrífugas utilizadas en la refinería	23
4.	Despliegue de resultados del medidor de color	28
5.	Perfil de color para cada capacidad de carga en la centrífuga No.1	47
6.	Perfil de color para cada capacidad de carga en la centrífuga No.2.....	48
7.	Perfil de color para cada capacidad de carga en la centrífuga No.4.....	59
8.	Perfil de color para cada capacidad de carga en la centrífuga No.5.....	50
9.	Datos de medición de color obtenidos en laboratorio de control de la calidad en función de los datos de color obtenidos en línea	52
10.	Resultado de color obtenido en línea para las cuatro centrífugas a capacidad de carga No. 4,0 (67 %)	53
11.	Resultado de color obtenido en línea para las cuatro centrífugas a capacidad de carga No. 4,5 (75 %)	54
12.	Resultado de color obtenido en línea para las cuatro centrífugas a capacidad de carga No. 5,0 (83 %)	55
13.	Resultado de color obtenido en línea para las cuatro centrífugas a capacidad de carga No. 5,5 (92 %)	56
14.	Resultado de color obtenido en línea para las cuatro centrífugas a capacidad de carga No. 6,0 (100 %)	57
15.	Comportamiento del Brix de jarabe en función de los tiempos de lavado	61

16.	Comportamiento del Pol de jarabe en función de los tiempos de lavado.....	62
17.	Comportamiento del color del jarabe en función de los tiempos de lavado.....	63

TABLAS

I.	Propiedades del azúcar producido en el ingenio.....	5
II.	Partes de la centrífuga batch.....	16
III.	Partes de la centrífuga.....	22
IV.	Variables en la operación de centrífugas.....	33
V.	Equipo y cristalería que se utilizó para la realización de la fase experimental.....	35
VI.	Reactivos que se utilizaron para la realización de la fase experimental.....	36
VII.	Media aritmética, varianza y desviación estándar para los colores obtenidos para cada máquina centrífuga en cada capacidad de carga	45
VIII.	Media aritmética, varianza y desviación estándar para los valores de Brix y Pol de jarabe obtenidos por la variación de los tiempos de lavado.....	46
IX.	Correlaciones obtenidas para los perfiles graficados y coeficientes de correlación en la centrífuga No. 1	48
X.	Correlaciones obtenidas para los perfiles graficados y coeficientes de correlación en la centrífuga No. 2	49
XI.	Correlaciones obtenidas para los perfiles graficados y coeficientes de correlación en la centrífuga No. 4	50
XII.	Correlaciones obtenidas para los perfiles graficados y coeficientes de correlación en la centrífuga No. 5	51

XIII.	Relación matemática obtenida entre los datos de medición de color de azúcar refinado en laboratorio y la medición en línea.....	52
XIV.	Acciones operativas propuestas para las mediciones de color fuera de parámetro.....	58

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
gpm	Galones por minuto
Brix	Grado Brix
°C	Grado Celsius
g	Gramo
kg	Kilogramo
lb	Libra
lb/h	Libra por hora
lb/Ton	Libra por tonelada
m	Metro
mL	Mililitro
mm	Milímetro
M	Molar (concentración)

Nm	Nanómetro
N	Normal (concentración)
%	Porcentaje
pH	Potencial de hidrógeno
rpm	Revoluciones por minuto
UI	Unidades de Color ICUMSA

GLOSARIO

Azúcar	Se denomina así al cristal, incluyendo la miel adherida a él, obtenida de la centrifugación de la masa cocida.
Brix	Expresión de la concentración de sólidos disueltos en una solución, indicadas por un hidrómetro “Brix” u otro dispositivo densimétrico.
Caña	Es la materia prima que se utiliza en un ingenio, más las materias extrañas y el agua que la acompañan.
Centrífuga	Máquina utilizada para separar los cristales de azúcar de la miel, en una masa cocida, por medio de la fuerza centrífuga producida al girar a altas velocidades.
Colorímetro	Instrumento electrónico utilizado para medir el color del azúcar en línea, es decir, sin necesidad de realizar muestreo o detener la línea de producción.
Jarabe	Es el coproducto obtenido de la separación de los cristales de azúcar de la masa cocida, en la estación de centrífugas.

Licor	Es azúcar disuelta en agua, que se utiliza en todo el proceso de refinería para luego cristalizar el azúcar recuperable.
Licor clarificado	Es el licor claro que se obtiene después del proceso de clarificación y que se alimenta a la estación de filtros.
Pol	Término utilizado en la industria azucarera para denotar la cantidad de azúcar contenida en un material azucarado.
Pureza real	Es la proporción de porcentaje de sacarosa en la materia seca.
Sacarosa	Aj. Quím. Azúcar, disacárido compuesto por una molécula de glucosa y otra de fructosa. Conocido en química como como azúcar de caña y cuya fórmula es: $C_{12}H_{22}O_{11}$.
Tacho	Vaso de cocción en vacío, en el cual se cristaliza la sacarosa contenida el licor clarificado.
Turbidez	Es la falta de transparencia de un líquido debida a la presencia de partículas en suspensión. Cuantos más sólidos en suspensión haya en el líquido, más sucia parecerá esta y más alta será

la turbidez. La turbidez es considerada una medida de la calidad, cuanto más turbia, menor será su calidad.

RESUMEN

En este trabajo se elaboró la relación entre la medición de color a la salida de las centrifugas y los tiempos de lavado, para mantener el azúcar dentro de los parámetros de control aceptables y disminuir los problemas de calidad ocasionados por mal control en la estación.

Para establecer un control adecuado del color final del azúcar, se elaboró el perfil de color, graficando el color del azúcar refino en función del tiempo de lavado para cada capacidad de las máquinas. Tomando en cuenta únicamente masas de entrada con parámetros de color, tamaño de grano y coeficiente de variación dentro de rangos.

Por medio de la medición de color variando los tiempos de lavado entre 10, 11, 12 y 13 segundos para la misma masa cocida, se obtuvieron datos para elaborar el perfil dentro de este rango de tiempos. Con estos mismos datos y la comparación entre ellos también se pudo determinar que todas las centrifugas presentan condiciones de remoción de color similares, exceptuando pocos casos aislados en los que la centrifuga No. 1 es la que presenta menor remoción, siendo aparentemente influenciada por la menor cantidad de vibración que reporta esta máquina en comparación con las otras 3.

Los datos de color obtenidos en línea se compararon con los datos de color obtenidos por el laboratorio de control de la calidad para obtener la relación real entre ambos valores. Ambas mediciones se encuentran en las mismas unidades y escalas dimensionales.

Por otro lado, se tomaron datos de los valores obtenidos para color, Brix, y Pol de jarabe reportando variaciones mínimas de color, 0,6 unidades en Brix, y 0,4 en Pol por cada segundo que se incrementa innecesariamente el lavado en las máquinas.

Después de todo lo anterior se propusieron acciones operativas, buscando mejorar la producción y optimizar el área por medio de acciones concretas para casos específicos.

OBJETIVOS

General

Elaborar el perfil de color de la estación de centrífugas de la refinería de Ingenio La Unión S.A., por medio de la relación entre los datos de color obtenidos por la medición en línea y el ajuste de los tiempos de lavado.

Específicos

1. Establecer la relación entre los datos de color de la medición en línea y los datos obtenidos por las mediciones de laboratorio de gestión de la calidad.
2. Evaluar cuál de las 4 centrífugas utilizadas presenta mayor reducción de color en relación al color de la masa cocida.
3. Proponer acciones operativas para los casos de mediciones de color fuera de los parámetros establecidos como límite superior y límite inferior.
4. Evaluar la influencia de la variación del lavado en el jarabe obtenido como subproducto de la centrifugación.

HIPÓTESIS

Es posible elaborar el perfil de color de color óptimo de azúcar refino en la estación de centrífugas de la refinería de azúcar de Ingenio La Unión S.A., por medio de la relación entre los datos de color obtenidos por la medición en línea y el ajuste de los tiempos de lavado.

INTRODUCCIÓN

El color es uno de los parámetros de calidad más importantes para el azúcar. Cuanto menor sea el color mayor es la calidad y los costos de producción son más altos. Azúcar con más color de lo acordado podrá ser rechazada por el cliente y devuelto a un costo enorme, pero azúcar con el color demasiado baja no obtiene premio.

Para las empresas que compran azúcar como ingrediente en productos propios, la gran tolerancia en los parámetros de especificación representa ajustes a sus procesos para absorber las variaciones de calidad. Mientras que para los fabricantes de azúcar, mantener los márgenes de trabajo abiertos representa un riesgo de costo por una mayor probabilidad de quejas e inconformidades, inclusive en algunos casos la pérdida de clientes muy importantes, o también agregar un exceso innecesario en la calidad al producto final, sin recibir mejores beneficios al entregarlo.

Se debe buscar mantener un control sobre el color final y el tiempo de lavado utilizado en las centrífugas para evitar entregar azúcar que no cumpla los parámetros de control establecidos, o de calidad sobredimensionada que no es premiada ni requerida por el cliente, y que implica costos más elevados, tanto así, como mayor cantidad de subproducto y mayores pérdidas de azúcar por dilución al usar más agua de la necesaria.

Para la producción de azúcar refino se ha construido e implementado una planta refinería. Esta planta refinería tiene una capacidad nominal de 900 toneladas métricas por día hasta 1 300 y consta de varias estaciones de operación, entre las cuales se encuentra la estación de centrífugas

discontinuas, donde se estableció el punto de control final para el color azúcar por medio de la graduación de los tiempos de lavado del grano.

Desde el punto de vista operativo el proceso de la refinería debe de esforzarse por mantener el color por debajo del límite acordado superior de 35 unidades ICUMSA, pero sin reducirse por debajo del límite acordado inferior de 25 unidades ICUMSA, el último ajuste es en los tiempos de lavado de la estación de centrífugas.

En este proyecto se elaboró el perfil de color óptimo a partir de la relación entre el color final del azúcar y los tiempos de lavado, permitiendo el control adecuado de uno de los subprocesos críticos para la calidad del producto (centrífugas) y la propuesta de acciones operativas para cuando el control falle.

La investigación se llevó a cabo en la estación de centrífugas de la refinería de azúcar y el laboratorio de gestión de calidad de fábrica de Ingenio La Unión S.A.

1. ANTECEDENTES

Ingenio La Unión S.A., comenzó en la Finca Belén, situada en Santa Lucía Cotzumalguapa, Escuintla el 20 de enero de 1970. Actualmente forma parte de los ingenios azucareros dentro la agroindustria azucarera de Guatemala.

El ingenio se caracteriza por la innovación y la promoción de la investigación como herramientas para la mejora de sus procesos y el crecimiento de los mismos. Para la zafra 2011-2012, se decidió ampliar el mercado al cual se proyecta Ingenio La Unión S.A. iniciando operaciones, por primera vez, la refinería de azúcar con capacidad de 900 a 1 300 TM por día. Proceso complejo que consta de varias estaciones a través de las cuales se modifican las características de azúcar crudo o azúcar blanco, según se decida utilizar como materia prima, para obtener azúcar refino como producto final.

El azúcar que se busca como producto final se caracteriza principalmente por el color debajo de 35 UI, muy bajo en comparación con el azúcar blanco estándar y crudo. Por esta razón la estación de centrifugas, en la cual se separa el azúcar refino como producto final del jarabe de azúcar que se reprocesa como subproducto, representa un punto importante de control para manejar las características que se desean obtener en el azúcar. Tomando en cuenta que la duración de los ciclos de operación de los equipos no es igual a los usados comúnmente en la producción de otros tipos de azúcar dentro de la fábrica del ingenio.

En el proceso de producción de azúcar refinado en Ingenio La Unión S.A., se aplican varias de las operaciones unitarias, que representan un campo importante de aplicación de la ingeniería química. Una de esas operaciones es la separación de la masa con cristales de azúcar en suspensión, a través de centrífugas discontinuas de tela metálica.

Desde el arranque de operaciones de la refinería de azúcar, los tiempos de lavado de las centrífugas se establecieron entre 10 y 13 segundos, y variaban con base únicamente al resultado de la prueba de colorimetría que el laboratorio realiza, implicando un desaprovechamiento del medidor de color en línea de alta tecnología, el cual grafica datos en una pantalla colocada en la estación centrífugas al alcance del operador, el cual puede guiar la operación de las máquinas a partir de los resultados desplegados en la misma.

En la estación de centrífugas se cuenta con una pantalla que grafica los resultados de color del medidor en línea y su proyección por batch. Pero el operador no contaba con ningún criterio ni relación sólida para la operación de la estación que le permitiera conjugar los resultados obtenidos por el colorímetro, los resultados obtenidos por laboratorio de gestión de calidad y las variables de operación de las máquinas.

Cuando el operador observaba una tendencia al aumento de color procedía inmediatamente a incrementar los tiempos de lavado, sin tener en cuenta la relación del colorímetro con el resultado del análisis de laboratorio con base al cual se toman decisiones operativas y de clasificación del producto final, implicando en ocasiones aumento innecesario de la cantidad de agua utilizada, aumento del tiempo de operación, pérdidas de azúcar por dilución y aumento de jarabe como subproducto para la estación de tachos.

Cuando observaba una tendencia de color más baja del parámetro superior, sin importar que fuera más baja que el parámetro inferior no aumenta la carga de las centrifugas, la cual normalmente se ha utilizado a un 66 % desperdiciando así capacidad y aumentando el tiempo de operación de la estación.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Aspectos generales del proceso de refinería de azúcar

Muchas personas al escuchar la frase refinería de azúcar, relacionan rápidamente el proceso a la disminución del tamaño del cristal, pero en realidad estos términos se refieren a la reducción del color en el cristal final.

En la siguiente tabla se muestran algunas cualidades de tres tipos de azúcar manejados en Ingenio La Unión S.A.

Tabla I. **Propiedades del azúcar producido en el ingenio**

Propiedad	Azúcar crudo	Azúcar blanco estándar	Azúcar Refino
Tamaño de cristal (μm)	600	600	600
Color (ICUMSA)	900	201 – 350	35
Humedad máxima (%)	0,15 – 0,50	0,08	0,04

Fuente: parámetros ingenio.

Para alcanzar los parámetros de clasificación del azúcar refino, el proceso de refinería consta de las siguientes estaciones o subprocesos:

2.1.1. Disolución

El objetivo en esta estación es diluir el azúcar que ingresa de fábrica a la refinería en una solución de temperatura y Brix controlado. Se pesa el azúcar que se envía de fábrica hacia refinería que cumple con requisitos de color, por medio de una báscula romana, la cual descarga directamente en una tolva de alimentación. La tolva a su vez, dosifica su contenido por medio de un tornillo sin fin hacia el tanque disolutor No. 1, en el cual se realiza el proceso de disolución del azúcar con agua dulce calentada por medio de un calentador de placas verticales.

El tanque disolutor No. 1 por rebalse alimenta el tanque disolutor No. 2, en el cual el licor (solución de azúcar) con un Brix adecuado para el proceso se bombea hacia un tanque pulmón, donde se retiene para ser trasladado a la siguiente estación.

2.1.2. Clarificación

En esta estación se busca reducir la turbidez del licor en un 80 % y el color en un 50 % por medio de clarificadores tipo rápido con un tiempo de retención de 45 minutos. En estos clarificadores se adiciona decolorante, floculante, sacarato de calcio y ácido fosfórico con el propósito de formar flóculos atrapando impurezas, que por medio de inyección de aire en el fluido llegan a la superficie y pueden ser separados por los barredores y desviados a basculas de espuma, en las cuales se cuantifica para determinar la cantidad de subproducto y azúcar aun recuperable en él.

2.1.3. Filtración

Se pasa el licor clarificado por filtros de presión horizontales de placas verticales, a las cuales se les forma una precapa de tierra diatomácea que funciona como medio filtrante.

Para garantizar una mejor remoción de color e impurezas se agrega carbón activado en polvo al licor clarificado reteniendo partículas que aportan color e impurezas que al pasar por la estación de filtros quedan atrapadas en las precapas, obteniendo así licor de color y turbidez más baja y pureza más alta a la salida.

Durante el proceso de filtración, el licor atraviesa de dos a tres etapas de filtración. En la primera filtración se remueve la mayor cantidad de color y turbidez, 30 % del licor clarificado, siendo los filtros en esta función los que se saturan a mayor rapidez, requiriendo un proceso de desendulce y limpieza para formar una nueva precapa. La segunda filtración tiene la misma función, pero los filtros en esta función presentan mayor tiempo de operación debido a que recibe el licor de primera filtración y lo vuelve a filtrar para obtener licor final libre de impurezas y con el color más bajo que se logra a las condiciones de operación establecidas. La tercera etapa es necesaria en ocasiones que el licor final o de segunda filtración aún puede ser pulido, para lo cual se cuenta con un filtro horizontal de cuatro cartuchos cilíndricos, antes de llegar al tanque de licor final para tachos.

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 alimentaran 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 llamada masa cocida.

La estación cuenta con un tanque de jarabe, un tanque de licor y uno doble función para alimentar cuatro tachos. Cada tacho cuenta con bomba de vacío tipo anillo líquido y condensador barométrico para obtener condiciones de vacío y temperatura óptimas para trabajar con vapor de primer efecto producido en el área de evaporadores en fábrica y no directo de calderas. Cada tacho es de simple efecto y tiene capacidad de 2 000 pies cúbicos.

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. El jarabe separado se descarga a otro tanque horizontal en el cual se diluye con agua para bajar Brix. Ya diluido el jarabe se bombea al tanque en la estación de cristalización para alimentar los tachos. Mientras que el azúcar húmedo es conducido por medio de un transportador vibratorio, en el cual se cuenta con un medidor de color en línea que se debe utilizar como guía para el control de los parámetros de operación de las centrífugas.

La estación cuenta con cuatro máquinas centrífugas que trabajan por batch, conectadas al recibidor de masas y al tanque horizontal de jarabe. Durante la operación las máquinas reciben carga del recibidor y hacen girar a gran velocidad una canasta interna hecha de tela perforada sobre un eje central fijo.

Aprovechando la fuerza centrífuga producida por la rotación, la masa cruda cargada en la canasta se pega a las paredes de la misma donde los cristales permanecen retenidos y el jarabe pasa a través de las perforaciones descargándose al tanque horizontal. Luego de la descarga del jarabe, se inyecta agua a alta presión durante 10 a 13 segundos para lavar los cristales que retienen jarabe en sus paredes. Al estar completamente lavado el cristal la máquina continúa con su rotación para secar el exceso de agua y después descargar el lote de cristales en el transportador vibratorio donde el medidor de color detecta el número de descarga, el número de máquina y obviamente el color de azúcar obtenido.

Del recibidor de masas se hace pasar a máquinas giratorias llamadas centrífugas. Aquí se separan los cristales de azúcar de la miel restante. La miel pasa a través de las telas, los cristales quedan atrapados dentro de las centrífugas y luego se lavan con agua. Las mieles vuelven a los tachos o bien se utilizan como materia prima para la producción de alcohol en las destilerías.

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 o en el peor de los casos, su pérdida. La humedad relativa del azúcar refino producido debe ser menor de 0,04 % a una temperatura de 32 °C para evitar aterronamientos dentro del silo.

El secado y enfriado se realiza en una secadora-enfriadora de cilindro inclinado rotatorio. El secado es realizado por la primera parte del cilindro por la cual se alimenta el azúcar en la parte superior e ingresa aire del ambiente calentado por un radiador conectado a una tubería de vapor, por el extremo del cilindro. El enfriado se realiza por la segunda parte del cilindro, descarga el azúcar seca y enfriada por la parte inferior y succiona aire por ese extremo del cilindro, el cual cuenta con un panel conectado a la tubería de enfriamiento de un chiller, por el cual el aire del ambiente se enfría a la temperatura necesaria para enfriar el azúcar secada.

2.1.7. Tamiz vibratorio ROTEX y control de peso

El tamiz vibratorio ROTEX es una caja rectangular en la cual se alimenta el azúcar que sale de la enfriadora, y separa los granos de tamaño pequeño que no se consideran como cristal y se clasifican como polvillo y puede presentar problemas por su inflamabilidad y explosividad en el transporte, tanto así como funcionar como pegamento y aterronar el azúcar en el almacenaje. El medio de separación es una malla que no permite el paso de granos mayores a 180 micrones deslizando estos por medio del movimiento giratorio que le transmite un motor ubicado en uno de los extremos. Mientras el grano se desliza por la parte superior de la malla y sale de un extremo del equipo, el polvillo atraviesa la malla y sale por la parte baja del equipo.

El control de peso se realiza en una báscula romana como la mencionada para la estación de disolución, esta cuantifica la producción de azúcar refino como producto final. El azúcar que sale del ROTEX se pesa y luego es transportada por medio de un conductor neumático al silo de almacenaje a 300 m de la refinería.

2.1.8. Almacenamiento en silo

Para conservar condiciones ambientales adecuadas de almacenamiento se cuenta con un silo domo de forma semiesférica con capacidad para 30 000 toneladas. El tiempo para que los cristales de azúcar alcancen sus condiciones de color y temperatura final es de dos días dentro del silo domo. El azúcar es conservada a granel dentro del silo domo.

El silo domo es acondicionado por medio de un sistema de tratamiento de aire que conserva las propiedades de temperatura, humedad y presión dentro del mismo. La semiesfera se alimenta desde la parte superior y se descarga por medio de tolvas ubicadas en fila a lo largo del diámetro en la parte inferior, las cuales descargan directamente sobre una banda que transporta el azúcar hacia las tolvas del envasado.

2.1.9. Envasado de sacos y jumbos

Se debe realizar en un ambiente higiénico y libre de cualquier partícula extraña que se pueda mezclar con el producto final. El azúcar luego de los dos días de maduración dentro del silo domo es extraída del mismo, por un transportador subterráneo que la traslada hasta un elevador que alimenta un tornillo sin fin que llena 3 tolvas, una para envasado de jumbos y otras dos para envasado de 50 kilogramos.

Para el empaqueo de sacos, 2 máquinas de costura industriales realizan el cierre del saco, que está listo para el almacenaje o distribución. El azúcar refinado es almacenado en sacos de 50 kilogramos o jumbos de 1 000 – 1 400 kilogramos en lugares previamente determinados, facilitando el control de calidad.

2.2. Aspectos generales de la centrífuga

Una vez que la masa cocida ha sido agotada y concentrada en los tachos, hay que proceder a separar los cristales de azúcar de la miel o jarabe. Para hacer esta separación, se utilizan las centrífugas.

2.2.1. Definición de la centrífuga

Es una máquina que aplica fuerza por rotación, a manera que empuja la materia contenida en su interior hacia afuera del centro de rotación. Este principio se utiliza para separar partículas en un medio líquido por medio de sedimentación. Son los equipos más utilizados por la industria azucarera en Guatemala para separación sólido-líquido, el grano de azúcar de la miel.

En los equipos giratorios se genera una fuerza centrífuga mucho mayor que en los equipos estacionarios (canastas operadas en forma mecánica que giran en el interior de una carcasa estacionaria). Al rotar un cilindro a alta velocidad, se introduce un esfuerzo de tensión considerable en la pared del mismo. Esto limita la fuerza centrífuga que puede generarse en una unidad de tamaño y material de construcción dado. Por lo tanto solo pueden generarse fuerzas muy intensas en centrífugas pequeñas.

La base física de la separación es la acción de la fuerza centrífuga sobre las partículas en rotación, que aumenta con el radio del campo rotacional y con la velocidad de rotación. La velocidad de sedimentación se determina por la densidad de partículas. Las partículas densas sedimentan primero, seguidas de las partículas más ligeras. En algunas condiciones las partículas muy ligeras pueden incluso permanecer en la fase líquida.

La fuerza centrífuga relativa guarda relación con el número de revoluciones del rotor por minuto conforme a la fórmula:

$$FR = 1,118 \times 10^{-6} \times r \times n^2 \quad \text{[Ecuación No. 1]}$$

En donde:

FR, es la fuerza centrífuga relativa (g).

r, es el radio en milímetros desde el pivote de la centrífuga hasta el punto analizado.

n, es el número de revoluciones por minuto.

2.2.2. Funcionamiento de la centrífuga

Al iniciarse el movimiento de la centrífuga, la carga se añade inmediatamente abriendo la compuerta del mezclador y la masa cocida se levanta dentro de la canasta debido a la fuerza centrífuga generada por la rotación de la misma. De este modo la masa cocida se distribuye sobre el revestimiento perforado, la miel o jarabe son despedidas hacia la envolvente y los cristales son retenidos. La centrífuga continúa hasta que los cristales de azúcar quedan lo más libre posible de mieles, después de lo cual los cristales pueden continuar siendo purgados mediante el rociado de agua.

Además del llenado, purgado y lavado, el ciclo incluye la descarga del azúcar, que se hace levantando la válvula de descarga ubicada en el fondo de la centrífuga. Enseguida, el descargador neumático baja mientras la canasta gira lentamente y el azúcar que es raspada de la tela por una cuchilla, cae en un transportador. El lavado no siempre se aplica en la fabricación de azúcar crudo, pero en la producción de azúcar refinado es esencial.

2.2.3. Descripción de centrífugas batch

Estas centrífugas pueden ser automáticas o semiautomáticas, aunque predominan las que se operan automáticamente. Esta centrífuga consiste en una canasta cilíndrica con agujeros y mallas, sujeta de una flecha central o “huso”. Tiene costados perforados que están forrados de telas metálicas, que contienen de 400 a 600 perforaciones por pulgada cuadrada

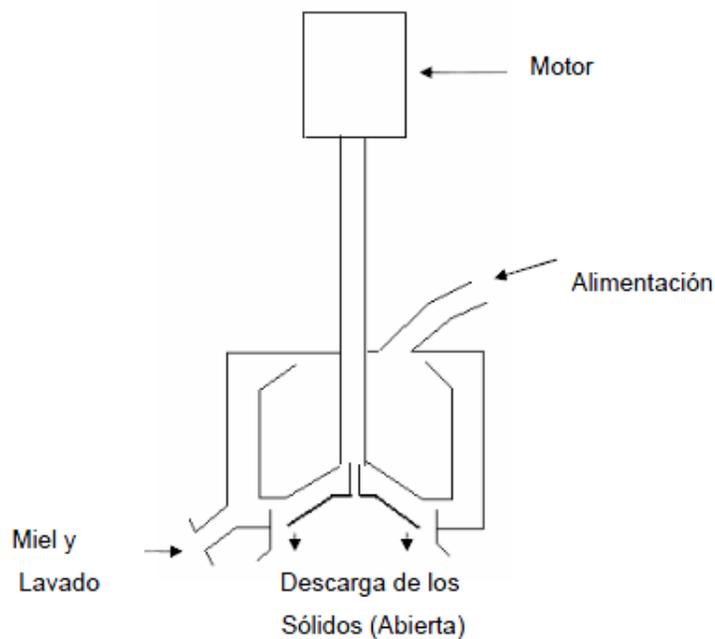
La canasta está diseñada para cargar la masa cocida y girar sobre la flecha central que está unida al motor ubicado en la parte externa superior y que mueve la máquina.

La canasta está perforada con numerosos orificios que permiten el paso de las mieles, los cuales son de 7 milímetros de diámetro y están separados aproximadamente 22 milímetros de pitch. Está provista de anillos que resisten la fuerza centrífuga, la malla de la canasta permite el paso de las mieles y retiene los cristales. El grosor de la canasta depende del diseño, y se calcula con base a la fuerza centrífuga que estará sujeta.

La canasta se encuentra abierta en su parte superior para permitir el ingreso de la masa cocida y en el fondo para descargar los cristales cuando la máquina se detiene. Cuando la máquina está trabajando antes de la descarga,

esta se mantiene cerrada por una tapadera en forma de cono invertido, fabricado de lámina delgada. La canasta está fija al eje por un tubo que ocupa la apertura del fondo, pero que deja espacio suficiente para realizar la descarga.

Figura 1. **Diagrama de carga y descarga de una centrífuga por lote.**



Fuente: REIN, Peter. Ingeniería de la caña de azúcar. p. 488.

La canasta está rodeada por una envoltura para recibir las mieles y para separar al operador de las partes móviles. La envoltura cuenta con una apertura en la parte superior que coincide con la de la canasta y que puede cerrarse por dos medias tapas que forman un anillo al cerrarse permitiendo el paso del eje por el centro.

Generalmente se emplea una batería de centrifugas conectadas en paralelo al receptor de templeas, para acelerar el proceso de separación. La tabla a continuación describe las partes de las centrifugas automáticas por lote.

Tabla II. **Partes de la centrífuga batch**

Parte	Descripción
Compuerta de alimentación	Esta permite la entrada de la masa cocida que se encuentra en el mezclador al interior de la centrífuga.
Canasto	Es cilíndrico y perforado gira sujeto al eje o flecha en el fondo del canasto.
Tela	La tela es de cobre con perforaciones de 4 mm de largo x 0,3 mm a 0,7 mm de ancho.
Contra tela	Malla que recubre el canasto. Sostén de alambre # 8 o dos de # 5 y # 8 (él # es el número de agujeros por metro cuadrado).
<i>Manifold</i> de lavado	Dentro del canasto está el <i>Manifold</i> del lavado que contiene varios rociadores o atomizadores, son de 5 a 9 dependiendo del tamaño de la máquina, estos lavan de forma pareja con agua caliente la masa cocida.
Envolvente	Es un cono invertido concéntrico al canasto, es por donde sale el azúcar hacia el conductor.
Cabezal	Este es el que acopla el eje del motor y el eje del canasto, contiene los cojinetes que los soportan, un amortiguador de hule evita la vibración y estabiliza la máquina.
Freno y motor	El freno puede ser de zapatas radiales o de discos y el motor de velocidad variable o de dos o tres velocidades.

Continuación de la tabla II.

Temporizadores y controles	Los temporizadores son lo que controlan los tiempos de lavado, carga y descarga, purga, separación de mieles, entre lavados, secado, aplicación del freno regenerativo, parada y puesta en marcha atrás y arranque automático. Los controles automáticos generalmente están instalados en un panel electrónico con transformadores y equipos para variar la velocidad gradualmente.
----------------------------	---

Fuente: REIN, Peter. Ingeniería de la caña de azúcar. p. 488.

2.2.4. Centrífugas instaladas en la estación

A continuación se describe la centrífuga por lotes utilizada en el proceso de refinería de Ingenio La Unión S.A.

2.2.4.1. Sistema de amortiguadores

Presenta la posibilidad de ajustar o cambiar el sistema de amortiguación del cabezal de valeros desde la parte exterior de la centrífuga sin necesidad de desarmar y deshabilitar la conexión eléctrica del motor principal, además de que el tiempo que se utiliza para reemplazar o ajustar un juego de amortiguadores es extremadamente corto (máximo 1 hora).

2.2.4.2. Cabezal de baleros

Siguiendo las instrucciones del manual de lubricación sobre los tipos de grasa y períodos de lubricación, la vida útil de los baleros es aproximadamente de 6 años, por lo que se evita desarmar el cabezal durante los primeros 5 años.

2.2.4.3. Centrador de descarga

En el proceso de descarga, la flecha principal de la canasta está sujeta por un dispositivo de rodillos circulares que desplazan sobre una guía en la flecha principal. Este dispositivo es posicionado por dos cilindros neumáticos durante el proceso de descarga, permitiendo un ajuste exacto de la distancia entre el arado de descarga y la tela de trabajo en toda la altura. Esto da como resultado una tela más limpia con un mínimo de residuos de azúcar. Con el sistema tradicional estos residuos de azúcar causan problemas de desbalanceo y se funden en la etapa de prelavado del siguiente ciclo aumentando la cantidad de azúcar en las mieles.

2.2.4.4. Descargador

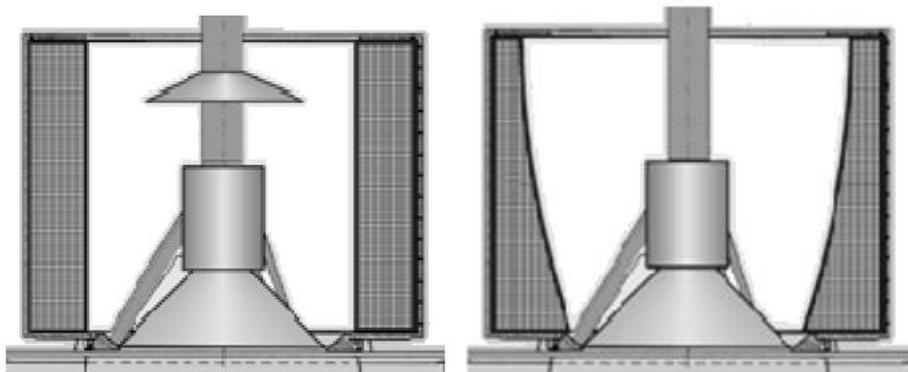
Todos los elementos de accionamiento y de mando para el movimiento horizontal están ubicados fuera de la canasta, evitando que el azúcar sea contaminada por la lubricación de las partes en movimiento. El arado de descarga cubre toda la altura interior de la canasta, por lo tanto no se requiere de un movimiento vertical para descargar el azúcar, a diferencia de los modelos tradicionales.

2.2.4.5. Disco distribuidor de masa

Durante la carga toda la masa debe caer sobre el disco distribuidor, de tal forma que la distribución sea uniforme en toda la pared de la canasta, de lo contrario la masa no puede distribuirse adecuadamente, provocando fuertes desbalances durante la aceleración de la centrífuga.

En la figura II. El plato distribuidor es el cono truncado en la parte superior, la masa distribuida se encuentra representada por las secciones rectangulares sombreadas a los bordes. Otras marcas no cuentan con este plato distribuidor, por lo que la capa que se adhiere a la tela no queda distribuida uniformemente.

Figura 2. **Distribución de carga en una centrífuga con plato distribuidor (izquierda) y distribución de carga en una centrífuga tradicional (derecha)**



Fuente: MALGOYRE, R. Centrífugal washing optimisatio. p. 12.

2.2.4.6. Cono de cierre de descarga

El cono de cierre de descarga se ubica por debajo del piso de la canasta y es accionado por un sistema neumático por la parte inferior de la canasta. Gracias a esta característica su mantenimiento es mínimo, ya que su accionamiento no requiere de resortes especiales u horquillas de izaje, que siempre se traban por falta de lubricación.

2.2.4.7. Tamiz o tela de trabajo

Las telas de trabajo son de unión sin lengüetas, sujetas por aros delgados de apriete. Este nuevo sistema permite un cambio de telas rápido y fácil.

2.2.4.8. Canasta

Las canastas son de alta seguridad. El cálculo y la fabricación se hacen conforme a las normas de la Asociación Profesional de la Industria Azucarera Alemana. Están fabricadas de acero inoxidable de la más alta calidad, resistente a la corrosión por fisuras de tensión e iones de cloro.

Debido a la alta calidad de los materiales y riguroso control de fabricación, el proveedor no fabrica canastas con anillos de refuerzo en el cuerpo de la carcasa, lo que la hace más segura, ya que en las canastas con anillos se corre el riesgo de roturas largas y estrechas por la cristalización en el acero inoxidable en las diferentes partes donde se pueda haber aplicado soldadura.

2.2.4.9. Unidad de control y convertidor de frecuencia

Estos junto con el motor principal son elementos desarrollados con la tecnología de punta de Siemens. Las etapas de funcionamiento y fallas son indicadas con imágenes y textos permitiendo una eficaz supervisión de la centrífuga.

Cuando se llevó a cabo la etapa del ciclo regenerativo de la centrífuga, el convertidor devuelve la energía a la red o, en caso de existir otra centrífuga, esta se retroalimenta mutuamente logrando un considerable ahorro de energía.

Otra característica técnica con que cuenta el convertidor es que cuando existen dos centrífugas, estas se pueden secuenciar entre sí, sin necesidad de equipo adicional.

2.2.4.10. Repuestos

Los repuestos para una centrífuga de batch son mínimos. En los primeros 5 años solo se necesitan las piezas de mayor desgaste y que están en contacto directo con el azúcar, tal como las telas, la punta del arado y los amortiguadores.

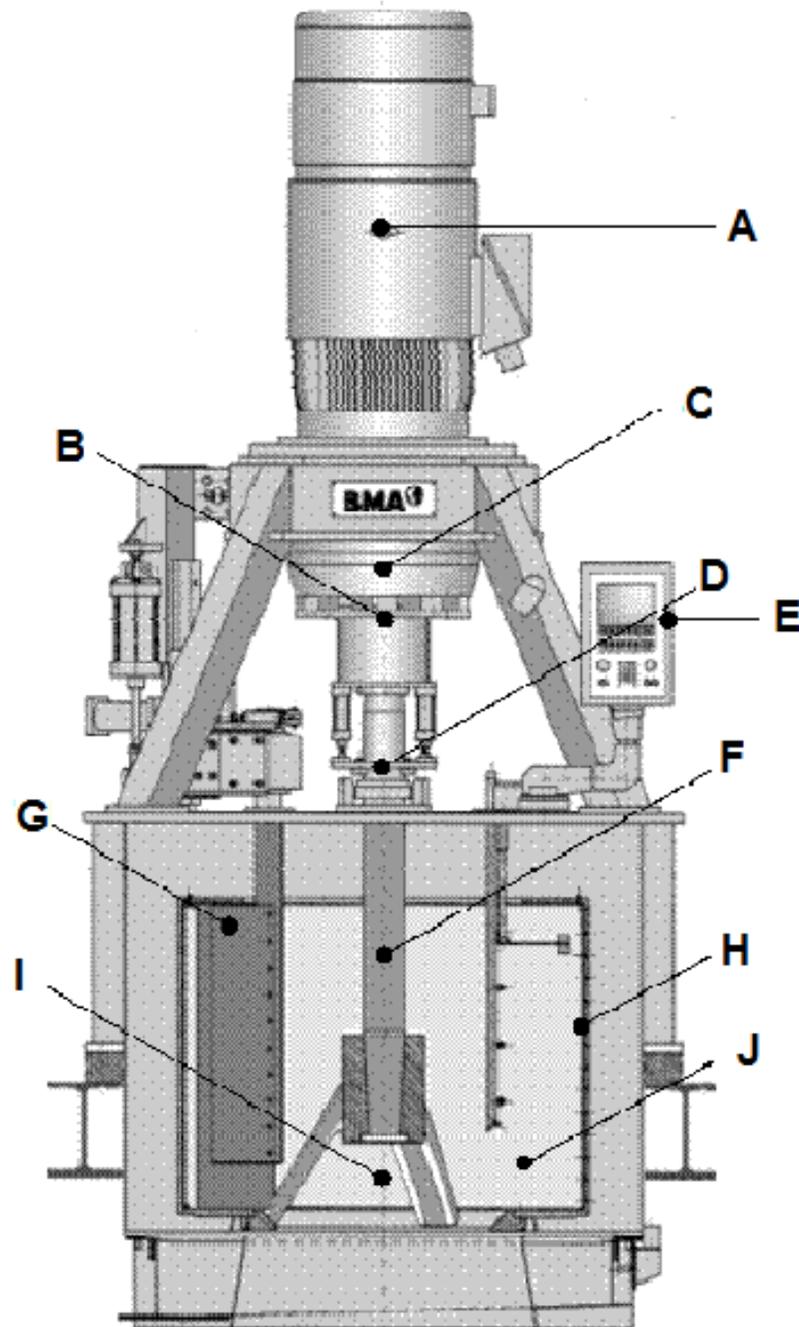
La siguiente tabla indica las partes mencionadas anteriormente y señaladas en la figura III.

Tabla III. **Partes de la centrífuga**

Parte	Descripción
A	Motor principal
B	Sistema de amortiguadores
C	Cabezal de baleros
D	Centrador de descarga
E	Unidad de control y convertidor de frecuencia
F	Disco distribuidor de masa
G	Descargador
H	Tela
I	Cono de cierre de descarga
J	Canasta

Fuente: REIN, Peter. Ingeniería de la caña de azúcar. p. 487.

Figura 3. Partes de las centrífugas utilizadas en la refinería



Fuente: MALGOYRE, R. Centrifugal washing optimisatio. p. 16.

2.3. Aspectos generales de la medición de color

A continuación se detallan los conceptos relacionados con el método oficial para realizar el análisis de color de azúcar refinado de acuerdo a los estándares latinoamericanos de azúcar, así como se presenta la descripción del equipo utilizado para la medición de color en línea.

2.3.1. Método ICUMSA para la medición de color GS2/3 – 9 (2005)

Este método se puede utilizar para todos los azúcares blancos cristalinos o pulverizados, con la condición que una solución prueba filtrada pueda ser preparada por el procedimiento especificado en el método. El método no es adecuado para azúcares que contienen materia coloreada, turbidez o aditivos, a tal grado que la filtración no sea viable.

2.3.1.1. Transmitancia de la solución

Si I_1 representa la energía radiante que incide sobre la primera superficie de la solución e I_2 representa la energía radiante que deja la segunda superficie de la solución. Entonces:

$$T = I_2 / I_1 = \text{transmitancia de la solución} \quad [\text{Ecuación No. 2}]$$

2.3.1.2. Transmitancia

Se representa T_{soln} como la transmitancia de una celda que contiene la solución y se representa T_{solv} como la transmitancia de la misma o celda duplicada que contiene el solvente puro. Entonces:

$T_s = T_{soln} / T_{solv}$ = transmitancia de la solución [Ecuación No. 3]

2.3.1.3. Absorbancia

Es la cantidad de intensidad de luz que absorbe la muestra. Para el propósito se define por la ecuación:

$A_s = -\log_{10} T_s$ = absorbancia de la solución [Ecuación No. 4]

2.3.1.4. Índice de absorbancia

Si se representa como b la longitud en centímetros del paso de absorbancia entre las dos superficies de la solución y c como la concentración en gramos por mililitro de la solución de azúcar, se tiene:

$a_s = A_s / (b c)$ = índice de absorbancia de la solución [Ecuación No. 5]

2.3.1.5. Color ICUMSA

El valor del índice de absorbancia multiplicado por 1 000 se reporta como color ICUMSA. Los valores resultantes son designados como unidades ICUMSA (IU).

2.3.1.6. Principio

El azúcar se disuelve en una solución buffer para ajustar la solución a pH 7,0 después se filtra a través de un filtro de membrana para remover la turbidez. La absorbancia de la solución filtrada es medida a una longitud de onda de 420 nanómetros y el color de la solución es calculado.

2.3.1.7. Procedimiento

Para la preparación se debe mezclar la muestra de azúcar vigorosamente. Pesar 50 gramos de azúcar y 50 mililitros de la solución *buffer* de TEA/HCl, en un matraz cónico de 250 mililitros y disolver por agitación a temperatura ambiente. Filtrar la solución muestra por medio de vacío a través de un filtro de membrana, en un matraz cónico limpio y seco. Si las soluciones filtran lentamente utilizar ayuda filtrante. Desgasificar la solución filtrada por 1 hora en un horno de vacío. Alternativamente desgasificar por inmersión del matraz cónico, que contiene la solución de azúcar, en un baño ultrasónico por 3 minutos.

Para la medición se prepara el instrumento de medición de color de acuerdo a las instrucciones del fabricante y ajustar la longitud de onda a 420 nanómetros. Enjuagar la celda de medición con solución de azúcar y después llenar. Determinar la absorbancia de la solución utilizando solución *buffer* TEA/HCl desgasificada y filtrada como estándar de referencia para color cero.

2.3.2. Medidor de color *Neltec ColourQ*

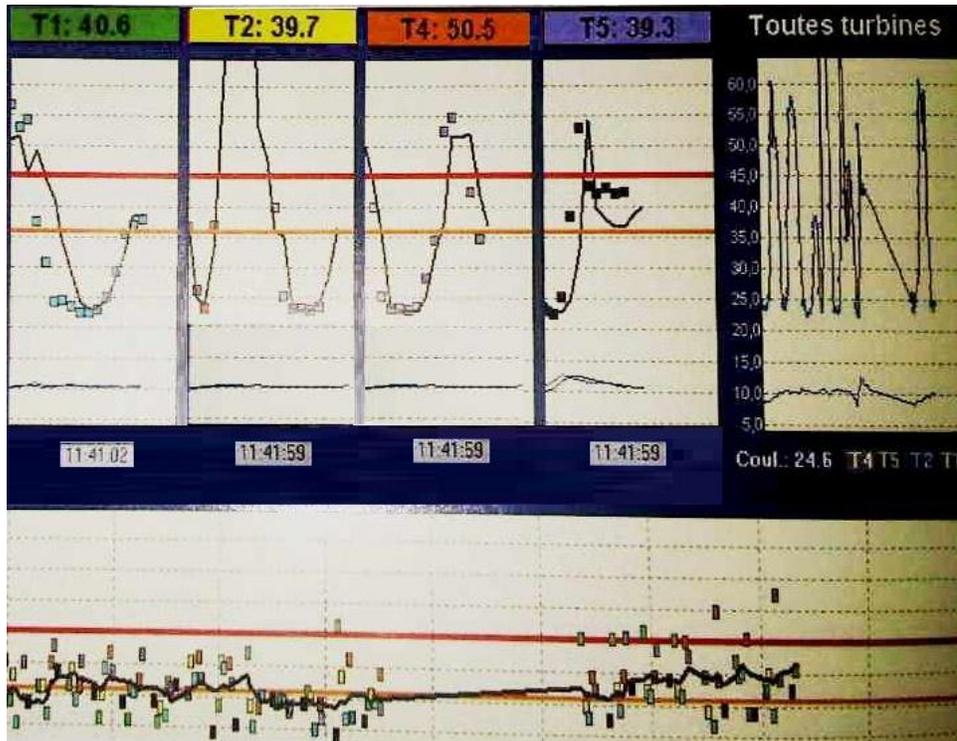
Este colorímetro mide el color del azúcar en tiempo real. Tiene la sensibilidad adecuada para medir pequeños cambios en el color. El instrumento trabaja con un método indirecto para medir los mismos resultados que serían obtenidos en el laboratorio con el método ICUMSA de color en soluciones. Muchas pruebas han documentado que el error del instrumento es insignificante respecto a los resultados de laboratorio

El instrumento puede ser aplicado al azúcar seco, después del secador o en la estación de carga (centrífugas) donde varias calidades de azúcar pueden haber sido mezcladas para obtener un cierto grado de calidad requerida por el cliente. Al utilizar el colorímetro en la estación de carga, puede medir, de manera secuencial, todas las centrífugas de la misma batería.

Desde el momento que el azúcar alcanza el instrumento, toma solo un segundo obtener el resultado de la medición de color. Por lo menos 1 500 mediciones por hora son obtenidas.

Para cada centrífuga, el instrumento mide el color de la descarga en muchos puntos, desde el principio de la descarga hasta el final. En la pantalla del instrumento, cada centrífuga cuenta con su propia ventana. En esta ventana un perfil de color de cada descarga es representado por una curva. En la ventana superior de la figura 4. Cada punto representa una medición. La línea negra en esta ventana muestra el perfil de color de la descarga previa. El número arriba de cada ventana indica el promedio de color de esa descarga. En la ventana inferior, un punto representa el promedio de color de una descarga. Aquí se puede comparar el desempeño de las centrífugas en muchas horas y dar seguimiento al color.

Figura 4. Despliegue de resultados del medidor de color



Fuente: Nielsen. On-line measurement of colour in refined sugars. p. 57.

El método convencional de laboratorio para determinar el color del azúcar no proporciona suficiente información para controlar el proceso. Esto puede apreciarse en la figura anterior. Ya que esta gráfica se obtuvo un poco después de la instalación del instrumento y antes de que los operadores de las centrífugas empezaran a usar los resultados para optimizar el funcionamiento de estas. Los perfiles de color de cada centrífuga muestran que parte de la descarga tiene cierto nivel de color bajo, lo cual demuestra que con la masa que ese momento se está procesando se pueden lograr niveles de color de ese tipo con el lavado adecuado. Pero hasta que no se tenga un perfil de color del proceso, no se podrá conocer si parte de la descarga no está siendo lavada

adecuadamente, que parte de esta descarga es la que tiene el problema, o que centrífuga descarga con mayor color que otras.

En resumen la medición de color, en tiempo real y con precisión, es capaz de hacer resaltar errores y situaciones factibles de mejora que no son detectables por otros métodos. El instrumento puede prevenir que azúcar fuera de especificación llegue al almacén o al cliente. El perfil de color de cada centrífuga es una poderosa herramienta para detectar incluso pequeños errores en una centrífuga. Con esta herramienta, el operador puede optimizar el desempeño de cada centrífuga.

3. DISEÑO METODOLÓGICO

3.1. Variables

La refinera de Ingenio La Unión S.A, cuenta con instrumentos de medición de alta tecnología instalados en la línea, con los cuales se pueden medir las variables del proceso en tiempo real. Las que se analizaron en la estación de centrífugas son:

- Color (UI): se realizó la medición de color para cada descarga de cada centrífuga, desde el principio hasta el final de las mismas.
- Carga (porcentaje): se midió la cantidad de masa cocida cargada en cada centrífuga.
- Tiempo de lavado (s): se midió el tiempo de lavado aplicado para cada centrífuga.

También se controlaron otras variables para mantener el proceso de centrifugación estable y lograr una buena calidad en el color del azúcar:

- Temperatura (°F): se midió la temperatura del agua que se utiliza para lavados, debe tener una temperatura mayor a 150 grados Fahrenheit, si el agua no llega a esta temperatura, el lavado no es totalmente eficiente, de acuerdo al diseño de las máquinas.

- Presión (psi): se midió la presión de agua a la cual las boquillas de la centrífuga realizan los lavados.
- Apertura de la válvula de carga: esta se reguló a manera que el disco de distribución de la masa se cubriera uniformemente y la carga en la canasta fuera uniforme.

Para determinar el perfil de color de las centrífugas se varió el tiempo de lavado para cada máquina desde 10 hasta 13 segundos para cada carga desde 4 a 6. Se utilizaron estos tiempos de lavado y cargas porque son los establecidos como rango de operación para el proceso.

Es muy importante tomar en cuenta que las templas producidas en los tachos estuvieron dentro de los parámetros de control del proceso, y las condiciones dentro del tanque mezclador de templas fueron las normales de operación, para evitar errores en los datos de salida por causas ajenas a la modificación de las variables.

Tabla IV. Variables en la operación de las centrifugas

No.	Variable	Dimensión	Tipo de variable	FACTOR POTENCIAL		FACTOR PERTURBADOR	
				Constante	Variable	Controlable	No Controlable
1	Carga de la masa	Kg	Independiente		X	X	
2	Tiempo de lavado	S	Independiente		X	X	
3	Presión de agua	Psi	NA	X		X	
4	Temperatura	°F	NA	X		X	
5	Apertura de la válvula de carga	%	Dependiente		X	X	
6	Color	UI	Dependiente		X	X	
7	Color de la masa cocida	UI	Independiente		X	X	
8	Nivel del tanque receptor de masas.	%	Dependiente		X	X	
9	Vibración de la centrífuga	%	Dependiente		X	X	

Fuente: elaboración propia.

3.2. Delimitación del campo de estudio

El estudio que se realizó fue de tipo cuantitativo ya que relacionó la cantidad de color con el tiempo de lavado en forma numérica, de tal forma que, posterior a los resultados y conclusiones obtenidas, se puede optimizar la estación de centrifugas, por medio de una automatización de la variable de lavado.

Se evaluarán dos aspectos importantes de la operación de la estación, que influyen en el color del azúcar obtenido después de la centrifugación:

- La carga de masa cocida que ingresa a la centrifuga.
- El tiempo de lavado que se aplica para cada ciclo.

El universo del estudio son las centrifugas y el colorímetro en línea en el área de recuperación de sacarosa en la refinería de Ingenio La Unión S.A.

3.3. Recursos humanos disponibles

- Investigador: Juan Diego Regalado Reyes
- Asesora: Inga. Claudia María Barrientos
- Operador de centrifugas
- Operador de secadora
- Analista de laboratorio

3.4. Recursos materiales disponibles

Los recursos físicos son proporcionados por la refinería de Ingenio La Unión S.A. y el laboratorio de control de calidad.

3.4.1. Equipo y cristalería

Los equipos y la cristalería utilizados en el desarrollo de la investigación, fueron los siguientes:

Tabla V. **Equipo y cristalería que se utilizó para la realización de la fase experimental**

EQUIPO	CRISTALERÍA	
Descripción	Descripción	Características
1. Polarímetro	1. Termómetro	<ul style="list-style-type: none">· De -10 °C a 140 °C· 250ml· 10, 50, 100 ml· Vidrio· Plástico· Plástico con tapadera· Porcelana· 250 ml
2. Refractómetro	2. Beakers	
3. Potenciómetro	3. Probetas	
4. Agitador magnético	4. Varillas de Agitación	
5. Balanza analítica	5. Pizetas	
6. Bomba de vacío	6. Recipiente de muestreo	
	7. Embudo Buschner	
	8. Kitasato	
	9. Celda de vidrio.	

Fuente: elaboración propia.

3.4.2. Reactivos

En la siguiente tabla se listan los reactivos utilizados para las pruebas analíticas:

Tabla VI. **Reactivos que se utilizaron para la realización de la fase experimental**

REACTIVO	ESPECIFICACIONES
HCl 0,1M	Solución de ácido clorhídrico a una concentración de 0,1 Molal
TEA 0,1 M	Solución de trietanolamina a una concentración de 0,1 Molal. Disolver 7,460g de trietanolamina líquida en agua, transferir a un matraz volumétrico de 500ml y aforar con agua.
Solución buffer de Trietanolamina / Ácido Clorhídrico (TEA/HCl)	Preparar la solución buffer un día antes de usar y guardar en un refrigerador a aproximadamente 4°C. Estabilizar la solución a temperatura ambiente antes de usar. Mida el pH del buffer antes de usar y ajuste, si es necesario, a pH 7,0 con solución de ácido clorhídrico.

Fuente: elaboración propia.

3.5. Técnica de investigación cualitativa y cuantitativa

La técnica de investigación fue cuantitativa y analítica, permitió examinar los datos de forma numérica, y establecer la relación entre los datos de salida y las variables para probar la hipótesis.

- Determinación de Brix (Método 1123): se determinan grados Brix en el jarabe, por el método refracto-métrico, con el fin de obtener el color final del azúcar a partir de una solución de la misma.
- Método refracto métrico: por medio de la variación del índice de refracción de un haz de luz, al atravesar una solución de azúcar, a la longitud de onda del sodio.
 - Pesar 150 gramos de muestra;
 - Disolver completamente en 450 gramos de agua (dilución 1:3)
 - Preparar un embudo de filtración con aproximadamente 2 gramos de ayuda filtrante;
 - Adicionar aproximadamente 100 centímetros cúbicos de la solución a analizar;
 - Filtrar la solución y descartar los primeros centímetros cúbicos del filtrado;
 - Colocar en la unidad óptica del refractómetro, el jugo filtrado requerido para hacer la determinación;
 - Registrar el porcentaje de Brix que indica el refractómetro;
 - Multiplicar el valor por el factor de dilución;
- Ensayo para determinar el color (Método ICUMSA)

Este análisis es empleado para controlar en el proceso las variables que influyen directamente en el color del producto final. Entre mejor sea el manejo del licor o la sustancia en proceso, mejor serán los resultados y se tendrá un azúcar más blanca.

- Pesar 30 +/- 0,1 gramos de azúcar crudo y agregarles 70 +/- 0,1 gramos de agua destilada, si ocurre problemas con el filtrado se puede preparar la solución con 10 +/- 0,1 gramos de azúcar y 90 +/- 0,1 gramos de agua destilada;
- Colocar la solución en una plancha de agitación magnética hasta disolver el azúcar A la solución ajustar el pH a 7,0 ±0,1 con NaOH o HCl 0,1 Normal;
- Filtrar la solución con un filtro millipore; usando la bomba de vacío; si es necesario agregar a la solución 1 gramo de ayuda filtrante;
- Ajustar el pH a 7,0 +/- 0,1 agregando solución de ácido clorhídrico 0,1 Molal o hidróxido de sodio 0,1 Molal. Agitar la solución continuamente hasta 6,95 luego dejar en reposo por aproximadamente 2 minutos;
- Colocar la solución en un baño ultrasónico por 3 minutos.;
- Leer en el refractómetro la cantidad de sólidos solubles, BRIX, anotar el dato;
- Encender el espectrofotómetro y seleccionar el modo de absorbancia, cambiar la longitud de onda a 420 nanómetros;
- Llenar una celda de 10 milímetros con agua destilada filtrada (la cual debe colocarse en el baño ultrasónico al igual que la muestra)

y colocar en cero el equipo. Llenar nuevamente la celda con la solución y leer la absorbancia;

Se obtiene el color de la muestra mediante la siguiente fórmula:

$$\text{Color ICUMSA (UI)} = \frac{\text{Absorbancia} * 100000}{\text{Brix} * 1 * \text{densidad}}$$

Nota: las características de aceptabilidad para análisis de azúcares crudos de 500 a 2 000 unidades de color, no deben exceder una diferencia de 110 unidades, y en condiciones de reproducibilidad, la diferencia para una misma muestra no debe ser mayor de 380 unidades.

- Ensayo para determinar la turbiedad del jarabe:
 - Se obtiene la turbiedad de la muestra mediante la siguiente fórmula:

$$\text{Turbiedad} = \frac{(A_1 - A_2) * 1000}{b * c}$$

Donde:

A_1 = Absorbancia de la muestra sin filtrar

A_2 = Absorbancia de la muestra filtrada

b = Longitud de la celda en cm

c = Concentración de la solución en g/cc

- Pol (“sacarosa aparente, método GS1/2/3/9-1”)

- Pesar en una cápsula $26,9 \pm 0,002$ gramos de azúcar y agregarlos a un balón, realizar tres lavados con agua destilada;
- Añadir al balón agua destilada hasta un volumen de 65 – 70 mililitros y disolver manual o mecánicamente. Verificar que se disuelva el azúcar completamente;
- Agregar a la solución de 3 a 5 espátulas de tierra filtrante u octapol activado, aproximadamente 1 a 2 gramos para azúcar de polarización menor de 99.3 grados Z y para polarización arriba de 99.3 grados Z, mezclar con agitación leve;
- Luego completar el volumen del bulbo del balón, con agua destilada, mezclar con agitación leve y permitir que la solución se enfríe (dejar aproximadamente 2 minutos de reposo);
- Aforar, asegurarse de que todo el cuello esté lavado, cuidar que ninguna burbuja de aire esté atrapada;
- Sellar el balón con un tapón limpio, seco y agitar vigorosamente;
- Dejar la solución por lo menos 2 minutos en reposo para asentar el precipitado. Filtrar la solución utilizando un único papel filtro, descartar los primeros ml de filtrado, luego recolectar un volumen aproximado de 50 a 60 mililitros;
- Enjuagar el tubo con la solución y descartar. Llenar el tubo de polarizar nuevamente (evitar la formación de burbujas), colocarlo en el polarímetro y esperar que se establezca la lectura y anotar.

3.6. Recolección y ordenamiento de la información

Se tuvieron variables manipuladas en la estación de centrifugas y datos de salida como resultado de la manipulación de las mismas. También información obtenida de mediciones de instrumentos en línea y mediciones de laboratorio. La información se organizó en tablas para analizarla.

Para los datos de color obtenidos por el laboratorio de gestión de calidad, se recolectó la muestra en la estación de la secadora, a la salida de la misma, ya que es el punto de muestreo del proceso del cual se determina el análisis de color.

Los datos obtenidos se encuentran en el apartado de datos calculados, apéndice 3.

3.7. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de datos

Toda la información obtenida de la investigación fue organizada y tabulada en tablas. Las tablas se elaboraron para diferentes ensayos con diferentes variables. Este ordenamiento facilitó el procesamiento de datos y el análisis que se realizó en cada ensayo.

3.8. Análisis estadístico

El experimento se llevó a cabo utilizando un diseño en bloques (carga de las centrifugas) con tratamientos (tiempo de lavado) y resultados (variables dependientes). El análisis estadístico se basó en una comparación simple a partir de las variables dependientes.

Los resultados se organizaron y se relacionaron gráficamente buscando realizar un ajuste para una ecuación mediante el análisis de regresión. Para el manejo de los datos se hicieron tres corridas y se tomó como medida representativa el promedio, teniendo por objetivo la reducción de imprecisiones en los datos obtenidos.

3.9. Plan de análisis de resultados

El plan de análisis de resultados que se utilizó en la investigación fue:

3.9.1. Métodos y modelos de análisis

Se realizó una investigación y un estudio a fondo de la literatura referente al tema, se llevaron a cabo pruebas, calibraciones y ajustes de instrumentos para obtener la información a analizar.

3.9.1.1. Métodos ICUMSA

Para el análisis de las muestras se utilizaron los métodos establecidos por la Comisión Internacional de Métodos Uniformes para el Análisis del Azúcar (ICUMSA por sus siglas en inglés), que es un organismo internacional de normalización, que publica procedimientos detallados de laboratorio para el análisis de azúcar.

El libro de métodos ICUMSA contiene instrucciones detalladas para analizar caña, azúcar cruda, blanca y refinada, remolacha, melaza, entre otros. El método ICUMSA para la medición de color es el GS2/3 – 9 (2005) descrito previamente.

3.9.1.2. Determinación de media para datos de muestreo

Para el análisis de los datos se utilizó la media aritmética para determinar el valor promedio del resultado de cada condición de operación, a partir de estos resultados se realizó un análisis completo. “La media aritmética de un conjunto no infinito de números, es igual a la suma de todos sus valores dividida entre el número de valores.”¹

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n a_i}{n} = \frac{a_1 + \dots + a_n}{n} \quad [\text{Ecuación No. 6}]$$

En la tabla VII y VIII se presentan los valores de las medias calculadas para las variables en la medición de color de azúcar y jarabe, estos valores fueron los utilizados para figuras y análisis de resultados.

3.9.1.3. Determinación de errores de muestreo

Para un mejor análisis de resultados se utilizó un análisis de dispersión de datos para representar la distancia de los valores de la variable de una medida de tendencia central e identificar el rango de los datos en un cierto sector del recorrido de la misma. La precisión se utilizó para describir la cercanía entre s, de los resultados obtenidos exactamente en la misma forma y en las mismas condiciones. Para describir la precisión de los conjuntos de datos se utilizaron tres términos: la desviación estándar, la varianza y el coeficiente de variación.

¹ JOHNSON, Robert. Estadística elemental. p. 24.

3.9.1.3.1. Varianza

La varianza identifica la diferencia promedio que hay entre cada uno de los valores respecto a su media.

$$s^2 = \frac{\sum(x_i - \bar{X})^2}{n - 1} \quad [\text{Ecuación No. 7}]$$

En este caso, se determinó varianza para valores de color, al ser estos las variables de análisis que permiten identificar el comportamiento de la reducción de color en el proceso de lavado.

3.9.1.3.2. Desviación estándar

La desviación estándar da como resultado un valor numérico que presenta 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.

$$S = \sqrt{\frac{\sum(x_i - \bar{X})^2}{n - 1}} = \sqrt{s^2} \quad [\text{Ecuación No. 8}]$$

Tabla VII. **Media aritmética, varianza y desviación estándar para los colores obtenidos para cada máquina centrífuga en cada capacidad de carga**

Centrífuga No. 1															
Tiempo	Carga 4,0			Carga 4,5			Carga 5,0			Carga 5,5			Carga 6,0		
	X	S ²	S												
10	19,9	0,08	0,27	29,6	0,21	0,46	33,9	0,37	0,61	39,6	0,05	0,22	44,1	0,09	0,37
11	18,9	0,13	0,36	25,0	0,21	0,46	32,0	0,23	0,48	37,6	0,05	0,22	41,0	2,19	1,81
12	16,4	0,03	0,18	21,2	0,21	0,46	28,5	0,24	0,49	31,5	0,63	0,79	35,5	1,50	1,50
13	15,0	0,08	0,27	20,2	0,11	0,34	26,5	0,70	0,84	30,3	0,11	0,34	34,6	0,73	1,05
Centrífuga No. 2															
Tiempo	Carga 4,0			Carga 4,5			Carga 5,0			Carga 5,5			Carga 6,0		
	X	S ²	S												
10	22,0	0,08	0,27	29,1	0,79	0,89	33,7	0,34	0,58	40,1	0,02	0,13	44,2	0,13	0,37
11	20,8	0,14	0,37	26,3	0,11	0,34	32,6	0,08	0,29	39,2	0,05	0,22	40,2	2,55	1,60
12	16,1	0,14	0,37	21,1	0,05	0,22	28,5	0,24	0,49	33,0	0,19	0,44	35,4	6,24	2,50
13	15,4	0,01	0,10	20,0	0,05	0,22	26,5	0,70	0,84	30,9	0,11	0,34	33,0	1,17	1,08
Centrífuga No. 4															
Tiempo	Carga 4,0			Carga 4,5			Carga 5,0			Carga 5,5			Carga 6,0		
	X	S ²	S												
10	22,1	0,08	0,27	28,4	0,05	0,22	31,6	0,16	0,40	39,7	0,11	0,34	41,4	0,36	0,60
11	22,0	0,52	0,72	25,6	0,21	0,46	30,7	0,23	0,48	39,1	0,11	0,34	38,6	0,75	0,87
12	16,6	0,27	0,52	20,7	0,19	0,44	28,5	0,24	0,49	33,4	0,21	0,46	37,1	1,00	1,00
13	15,3	0,13	0,36	18,5	0,00	0,00	26,5	0,70	0,84	30,9	0,11	0,34	35,6	1,86	1,36
Centrífuga No. 5															
Tiempo	Carga 4,0			Carga 4,5			Carga 5,0			Carga 5,5			Carga 6,0		
	X	S ²	S												
10	25,1	0,66	0,81	31,0	0,05	0,22	30,9	0,08	0,29	39,8	1,89	1,37	43,4	0,06	0,24
11	22,5	0,13	0,36	26,0	0,19	0,44	29,6	0,04	0,19	38,5	0,19	0,44	41,8	0,13	0,37
12	18,1	0,21	0,45	21,7	0,11	0,34	28,5	0,24	0,49	33,2	0,05	0,22	38,1	0,08	0,28
13	16,6	0,29	0,54	19,4	0,21	0,46	26,5	0,70	0,84	30,2	0,11	0,34	36,5	0,40	0,63

Fuente: elaboración propia.

Tabla VIII. **Media aritmética, varianza y desviación estándar para los valores de Brix y Pol de jarabe obtenidos por la variación de los tiempos de lavado**

Tiempo	Brix			Pol		
	X	S ²	S	X	S ²	S
10	76,42	0,004	0,05	33,24	0,001	0,027
11	76,67	0,004	0,05	33,43	0,001	0,027
12	77,02	0,004	0,05	33,61	0,001	0,027
13	77,17	0,004	0,05	33,74	0,001	0,027

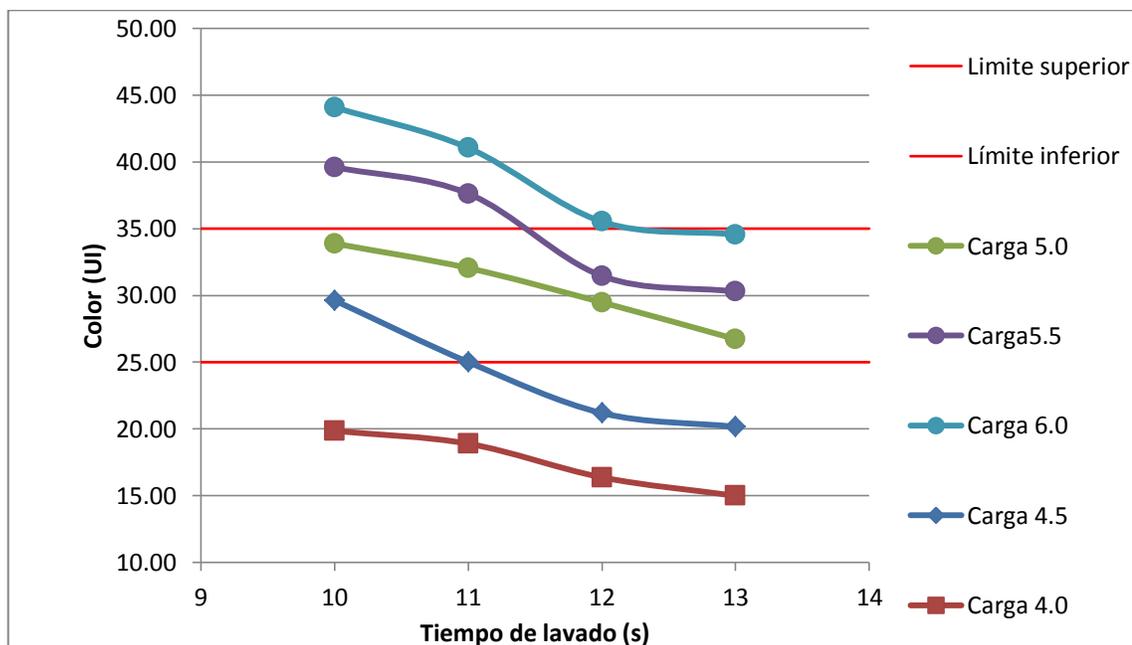
Fuente: elaboración propia.

4. RESULTADOS

4.1. Perfil de color para cada capacidad de carga de las máquinas centrífugas

A continuación se presentan el perfil de color obtenido para las capacidades de carga de 4,0 (67%), 4,5 (75%), 5,0 (83%), 5,5 (92%) y 6,0 (100%). Las cuales son las capacidades de trabajo definidas por el fabricante.

Figura 5. Perfil de color para cada capacidad de carga en la centrífuga No. 1



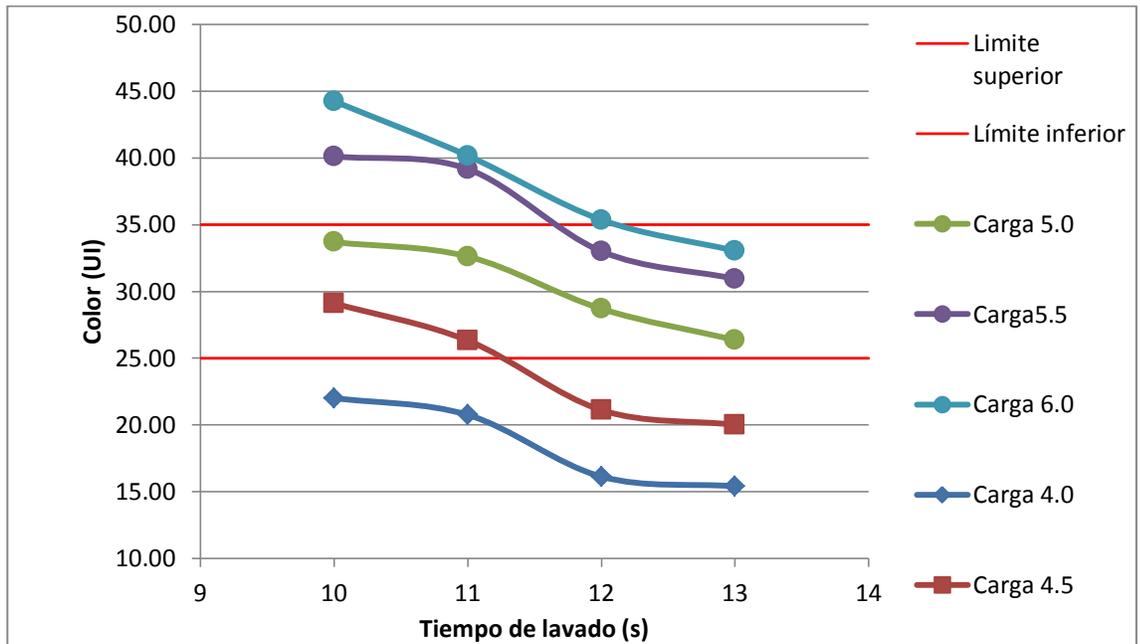
Fuente: datos calculados.

Tabla IX. **Correlaciones obtenidas para los perfiles graficados y coeficientes de correlación en la centrífuga No. 1**

Capacidad de carga	Relación Matemática	R ²
4.0	$y = -19,49\ln(x) + 65,03$	0,97
4.5	$y = -37,13\ln(x) + 114,5$	0,95
5.0	$y = -39,12\ln(x) + 134,17$	0,95
5.5	$y = -39,02\ln(x) + 129,85$	0,93
6.0	$y = -29,26\ln(x) + 101,56$	0,98

Fuente: datos calculados.

Figura 6. **Perfil de color para cada capacidad de carga en la centrífuga No. 2**



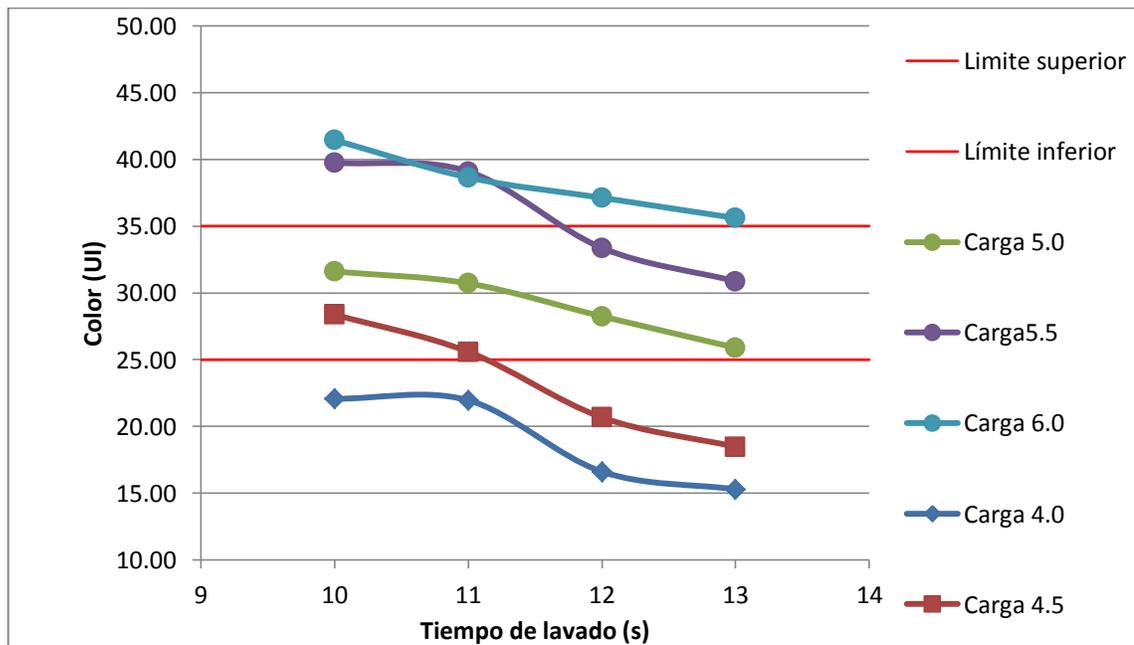
Fuente: datos calculados.

Tabla X. **Correlaciones obtenidas para los perfiles graficados y coeficientes de correlación en la centrífuga No. 2**

Capacidad de carga	Relación Matemática	R ²
4.0	$y = -37,27\ln(x) + 114,98$	0,95
4.5	$y = -27,94\ln(x) + 86,681$	0,92
5.0	$y = -29,18\ln(x) + 101,46$	0,95
5.5	$y = -38,32\ln(x) + 129,22$	0,92
6.0	$y = -44,03\ln(x) + 145,54$	0,98

Fuente: datos calculados.

Figura 7. **Perfil de color para cada capacidad de carga en la centrífuga No. 4**



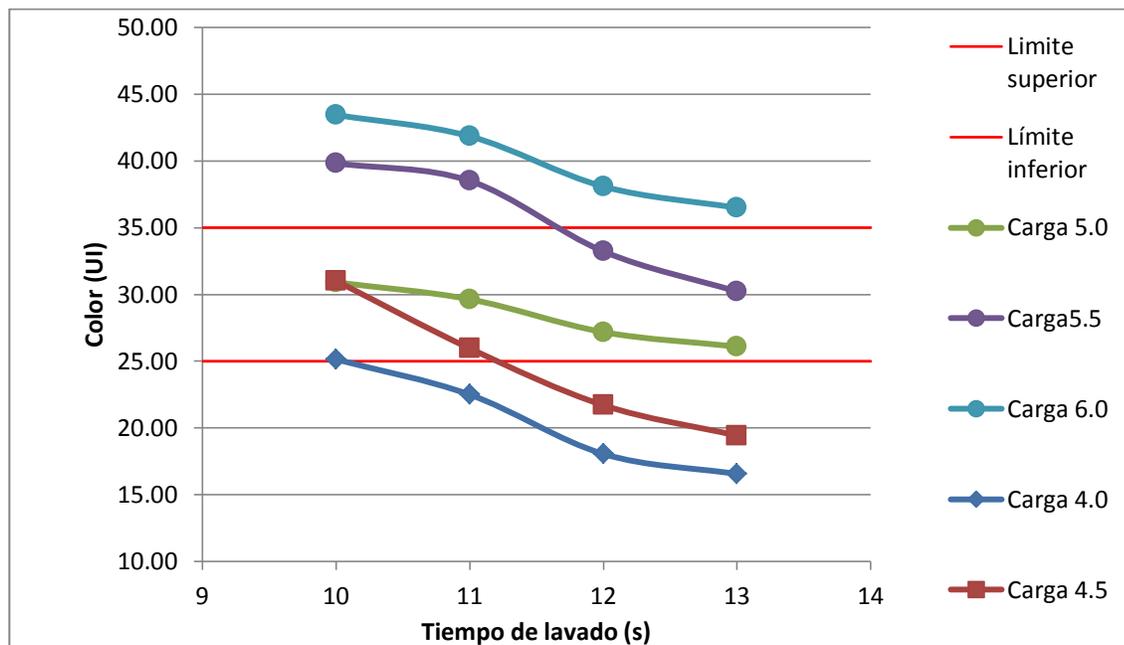
Fuente: datos calculados.

Tabla XI. **Correlaciones obtenidas para los perfiles graficados y coeficientes de correlación en la centrífuga No. 4**

Capacidad de carga	Relación Matemática	R ²
4,0	$y = -19,49\ln(x) + 65,035$	0,97
4,5	$y = -37,13\ln(x) + 114,5$	0,95
5,0	$y = -19,84\ln(x) + 77,684$	0,96
5,5	$y = -36,74\ln(x) + 125,34$	0,92
6,0	$y = -21,88\ln(x) + 91,532$	0,98

Fuente: datos calculados.

Figura 8. **Perfil de color para cada capacidad de carga en la centrífuga No. 5**



Fuente: datos calculados.

Tabla XII. **Correlaciones obtenidas para los perfiles graficados y coeficientes de correlación en la centrífuga No. 5**

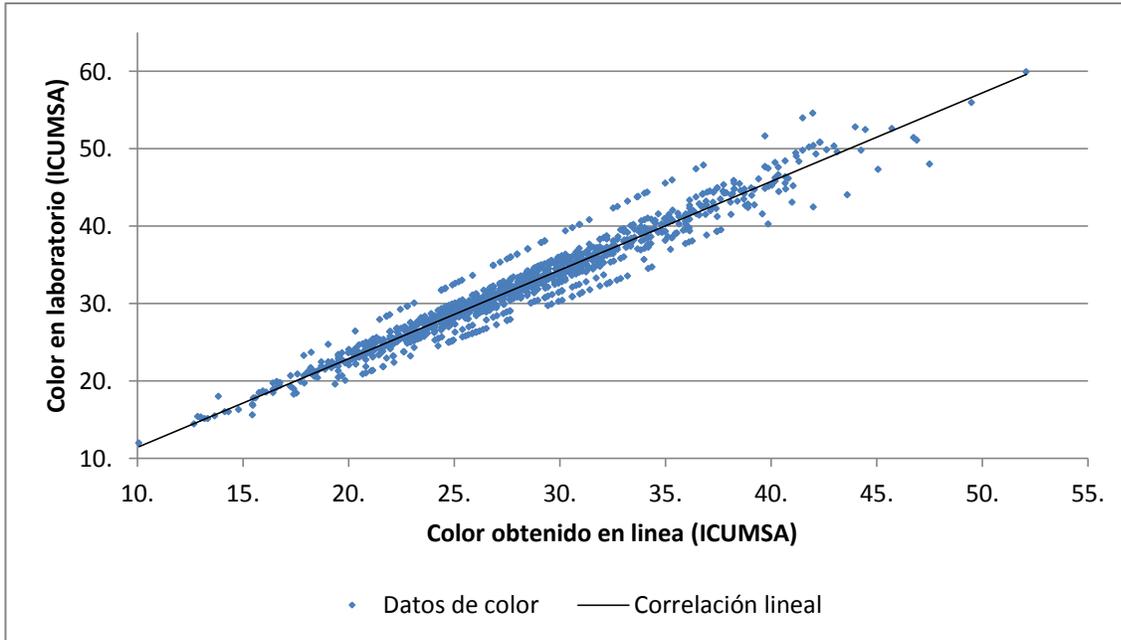
Capacidad de carga	Relación Matemática	R ²
4,0	$y = -34,58\ln(x) + 104,9$	0,97
4,5	$y = -44,84\ln(x) + 133,8$	0,98
5,0	$y = -16,26\ln(x) + 68,53$	0,98
5,5	$y = -38,77\ln(x) + 129,9$	0,95
6,0	$y = -28,14\ln(x) + 108,6$	0,97

Fuente: datos calculados.

4.2. **Relación entre los datos de color de la medición en línea y los datos obtenidos por el laboratorio de gestión de la calidad**

A continuación se muestra la gráfica que relaciona los datos de color del azúcar refino para la zafra 2011-12 obtenidos por el laboratorio de control de la calidad, en función de la medición de color obtenida en línea y se muestra la correlación matemática que mejor los representa.

Figura 9. **Datos de medición de color obtenidos en laboratorio de control de la calidad en función de los datos de color obtenidos en línea**



Fuente: datos calculados.

Tabla XIII. **Relación matemática obtenida entre los datos de medición de color de azúcar refinado en laboratorio y la medición en línea**

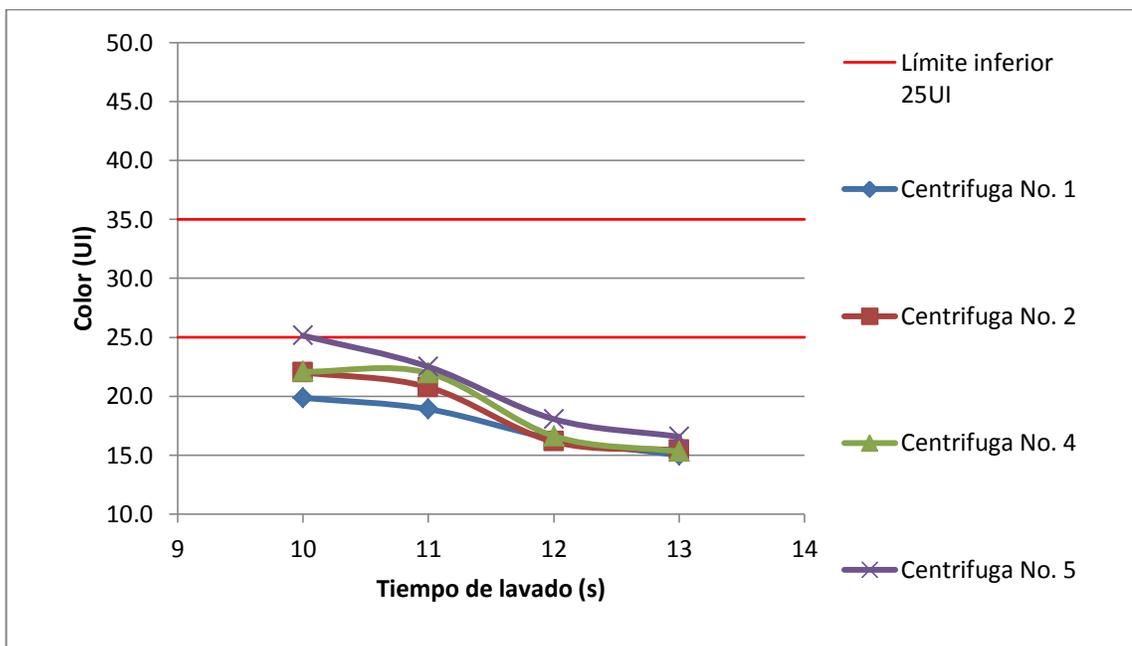
Relación Matemática	R ²	Y = Color de laboratorio X = Color en línea
$y = 1,1446x - 0,0474$	0,94	

Fuente: datos calculados.

4.3. Evaluación de las 4 máquinas centrífugas para determinar cuál presenta menor remoción de color

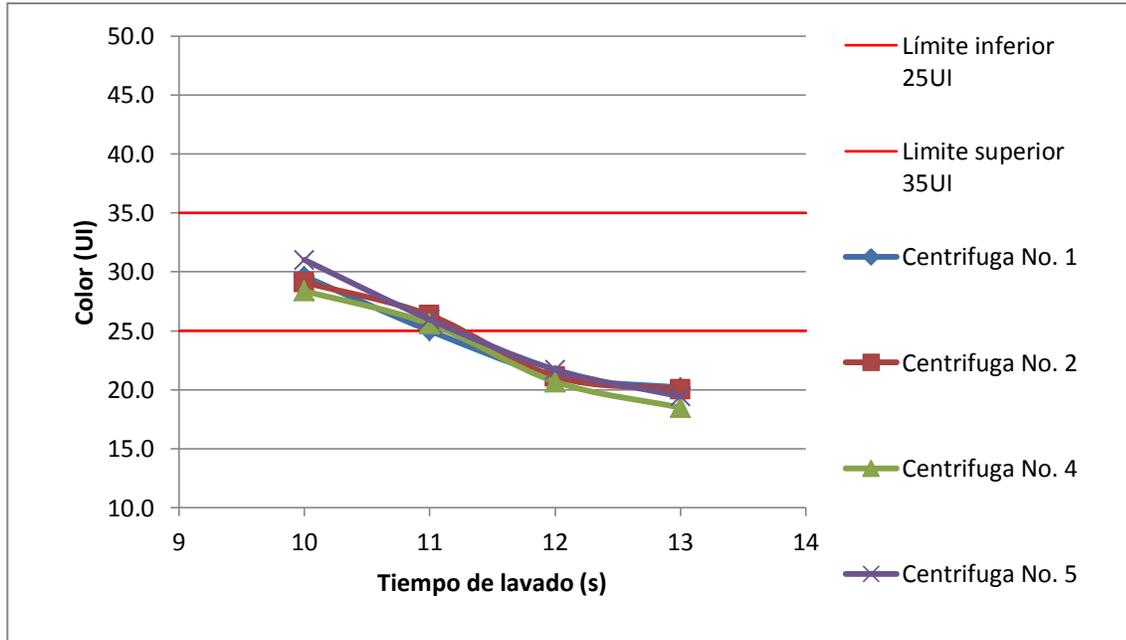
A continuación se presentan los gráficos que se obtuvieron como resultado de la evaluación para determinar la máquina centrífuga que presenta colores de azúcar refino más bajos en su descarga.

Figura 10. Resultado de color obtenido en línea para las cuatro centrífugas a capacidad de carga No. 4 (67 %)



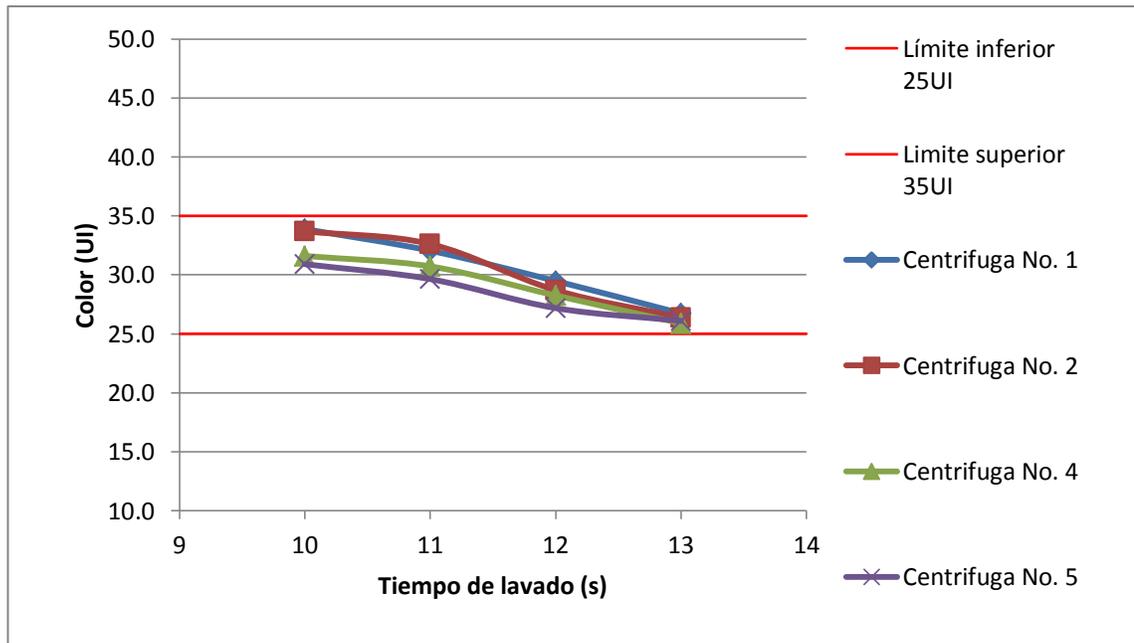
Fuente: datos calculados.

Figura 11. Resultado de color obtenido en línea para las cuatro centrifugas a capacidad de carga No. 4,5 (75 %)



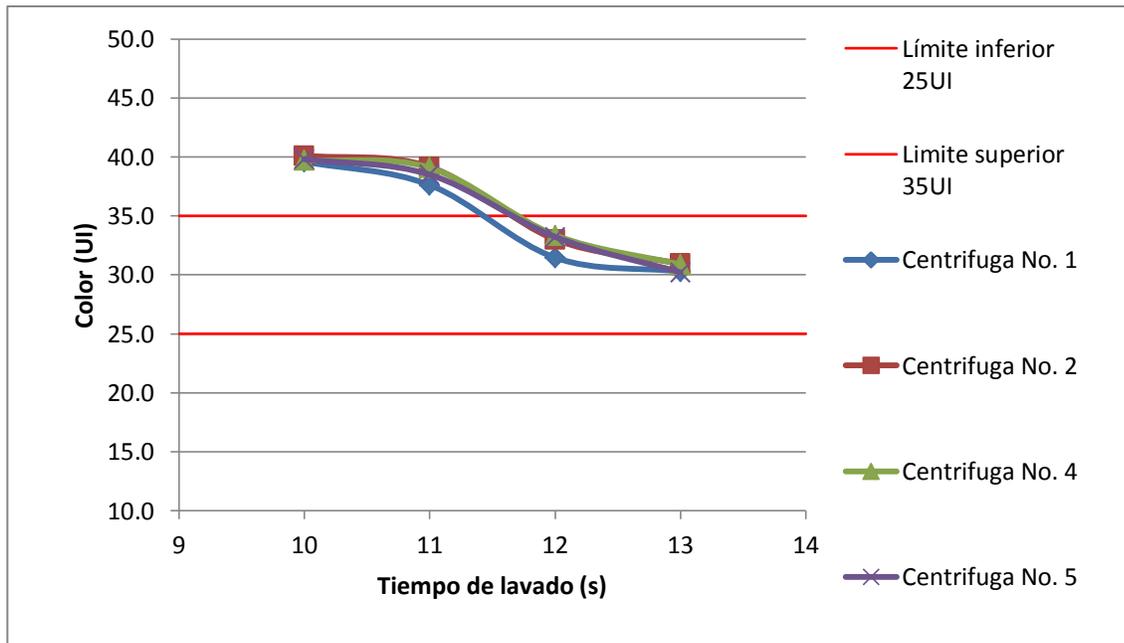
Fuente: datos calculados.

Figura 12. Resultado de color obtenido en línea para las cuatro centrifugas a capacidad de carga No. 5,0 (83 %)



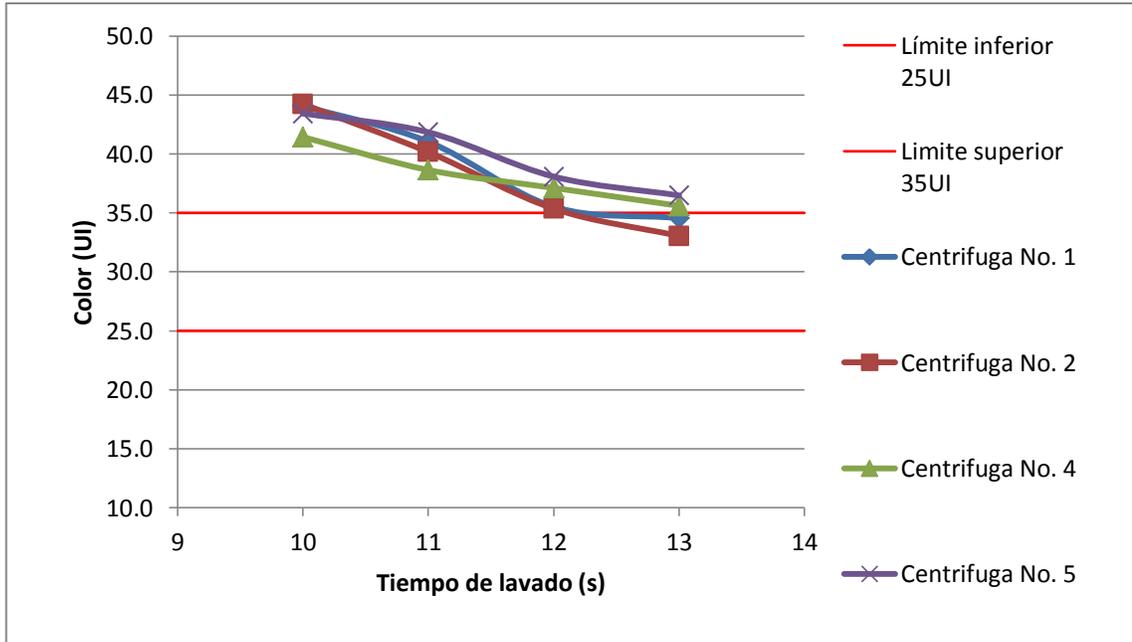
Fuente: datos calculados.

Figura 13. Resultado de color obtenido en línea para las cuatro centrifugas a capacidad de carga No. 5,5 (92 %)



Fuente: datos calculados.

Figura 14. **Resultado de color obtenido en línea para las cuatro centrífugas a capacidad de carga No. 6,0 (100 %)**



Fuente: datos calculados.

4.4. **Acciones operativas propuestas para casos con medición de color en línea fuera de parámetros de control establecidos**

En la siguiente tabla se resumen las acciones operativas propuestas para casos en que se obtengan mediciones de color en línea por debajo de 25 ICUMSA y por arriba de 35 ICUMSA, después de haberse ajustado las máquinas a un control automático de acuerdo a los perfiles de color encontrados.

Tabla XIV. **Acciones operativas propuestas para las mediciones de color fuera de parámetro**

Caso	Acción operativa propuesta
Medición de color por debajo de 25UI al iniciar la purga.	Revisar que la presión de agua no sea superior a 90 psig, y la temperatura se encuentre por debajo de 80°C, de ser así ajustar la válvula de agua hacia centrífugas y revisar que la temperatura de trabajo de los tachos esté dentro de rango.
Medición de color por debajo de 25UI para una masa cocida completa y rica en grano.	Cambiar la operación automática de las centrífugas a operación manual y aumentar la carga de las máquinas de 0,5 en 0,5 hasta llegar al color deseado, hasta terminar la purga de la templa.
Medición de color por debajo de 25UI para una masa cocida completa y pobre en grano	Cambiar la operación automática de las centrífugas a operación manual y disminuir los tiempos de lavado de un segundo en un segundo, hasta terminar la purga de la templa.
Medición de color por debajo de 25UI cuando los colores de licor y/o jarabe son bajos.	Corregir o aumentar la relación jarabe/licor en la estación de tachos para incrementar el color de la masa cocida en el mezclador de templeas.

Continuación de la tabla XIV.

<p>Medición de color por arriba de 35UI al iniciar la purga o repentinamente.</p>	<p>Revisar que la presión del agua se encuentre por arriba de 85psig y la temperatura del agua se encuentre sobre los 70°C. De no ser así chequear el nivel del tanque de agua caliente se encuentre como mínimo en un 30%, que la presión en las bombas que alimentan el agua caliente se encuentre por arriba de los 85psig y que las válvulas de paso se encuentren abiertas.</p>
<p>Medición de color por arriba de 35UI al iniciar la purga o gradualmente.</p>	<p>Revisar que las boquillas de las flautas de inyección no se encuentren obstruidas, y los lavados de las canastas de las máquinas se realicen correctamente de acuerdo a la secuencia programada.</p>
<p>Medición de color por arriba de 35UI cuando los colores de jarabe y/o licor son altos.</p>	<p>Corregir o reducir la relación jarabe/licor en la estación de tachos para disminuir el color de la masa cocida en el mezclador de templeas.</p>
<p>Medición de color por arriba de 35UI cuando se trata de una masa cocida completa y pobre en grano.</p>	<p>Cambiar la operación automática de las centrifugas a operación manual y disminuir la carga de las máquinas de 0,5 en 0,5 hasta obtener el color deseado, se debe continuar hasta terminar la purga de la templea.</p>
<p>Medición por arriba de 35UI y se trata de una masa cocida completa y rica en grano.</p>	<p>Cambiar la operación automática de las centrifugas a operación manual y aumentar los tiempos de lavado de 1 segundo en 1 segundo, se debe continuar hasta terminar la purga de la templea.</p>

Continuación de la tabla XIV.

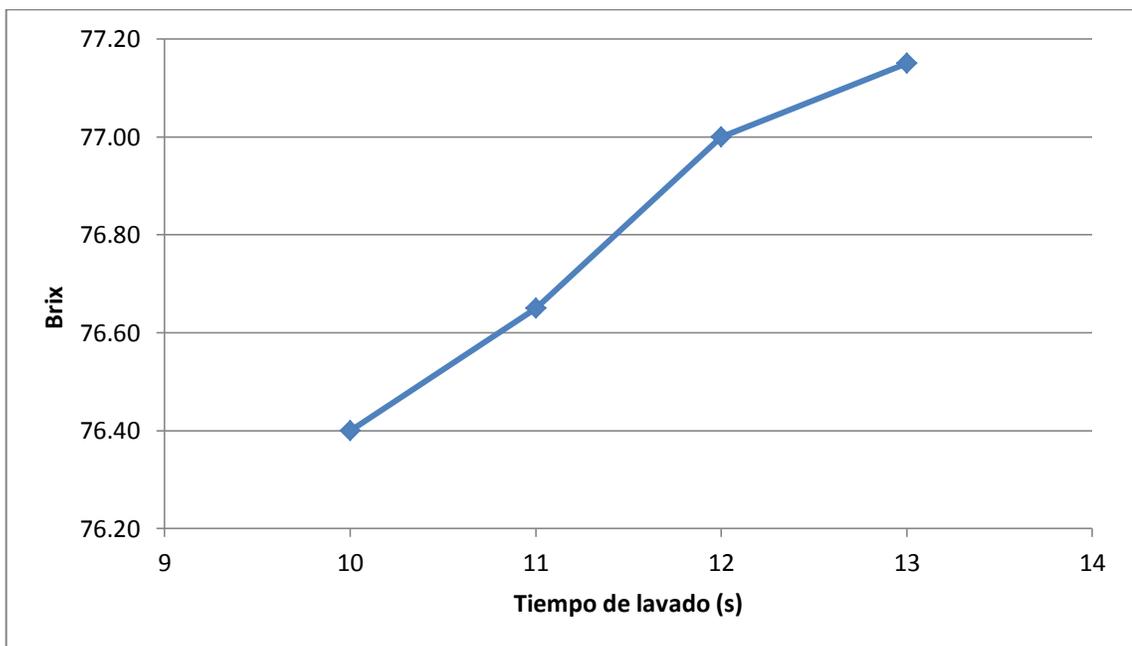
<p>Medición de color por arriba de 35UI que tiene por consecuencia incremento en la cantidad de jarabe producido.</p>	<p>Abrir la alimentación de jarabe hacia el tanque de doble función. Si se tienen niveles altos en los tanques de jarabe y doble función, aumentar la cantidad de jarabe que se retorna a clarificación y/o el flujo de <i>Run-Off</i> hacia fábrica, para evitar derrames e inestabilidad en los ritmos de purga.</p>
<p>Medición de color por arriba de 35UI para 2 templeas seguidas.</p>	<p>Elaborar en la estación de tachos una masa cocida con menor relación jarabe/licor o únicamente con licor, detener la purga cuando exista suficiente espacio en el mezclador para una templea nueva, luego descargarla en el tanque mezclador para disminuir el color de la masa cocida existente dentro del mismo.</p>
<p>Medición de color por arriba de 35UI constante y que no se puede reducir.</p>	<p>De no lograr disminuir el color de la masa en purga, coordinar con el supervisor, el operador de centrifugas y operador de secadora una parada corta para habilitar el envasado de emergencia y se reporta a laboratorio y bodega, un cambio o reclasificación en el azúcar producido. Cuando se recuperen los colores de purga dentro de parámetros, programar otra parada y deshabilitar el envasado de emergencia, para continuar con la operación normal.</p>

Fuente: elaboración propia.

4.5. Influencia de la variación de los lavados en el jarabe obtenido como subproducto de la centrifugación

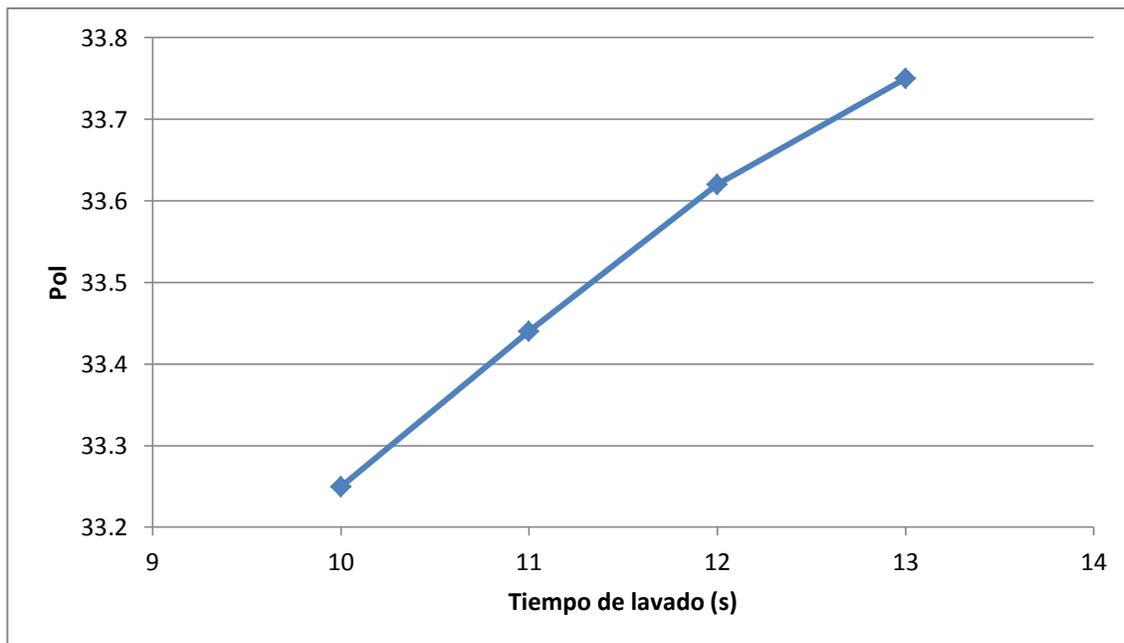
En las siguientes gráficas se muestran los efectos de la variación de los tiempos de lavado en las condiciones del jarabe que regresa al proceso para ser reutilizado.

Figura 15. Comportamiento del Brix de jarabe en función de los tiempos de lavado



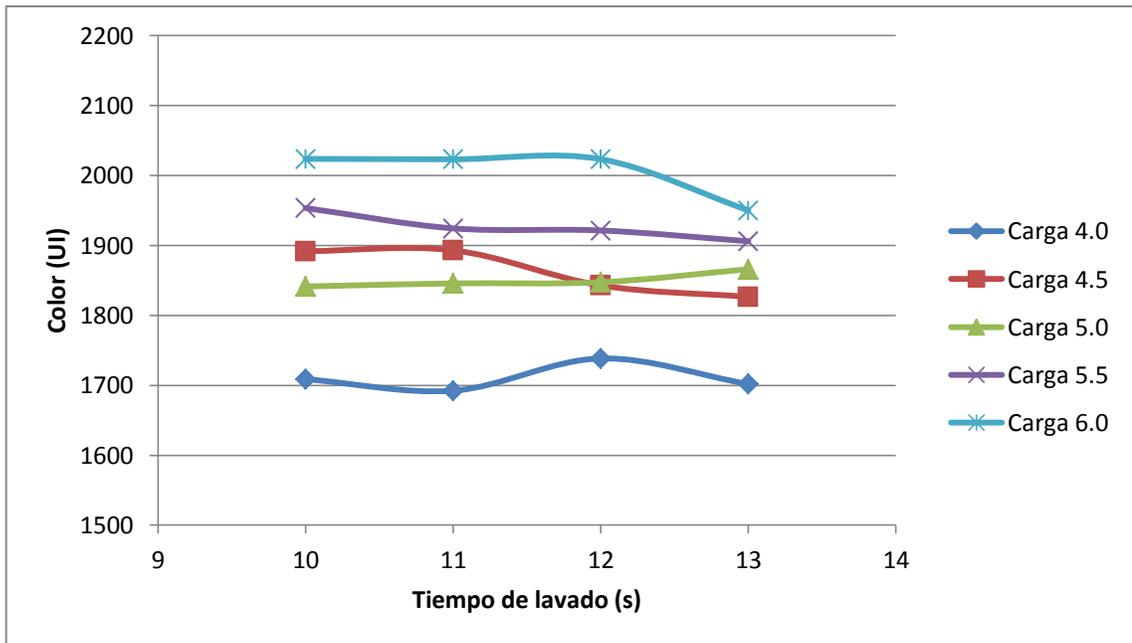
Fuente: datos calculados.

Figura 16. **Comportamiento del Pol de jarabe en función de los tiempos de lavado**



Fuente: datos calculados.

Figura 17. **Comportamiento del color del jarabe en función de los tiempos de lavado**



Fuente: datos calculados.

5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Buscando representar el comportamiento del color en la estación de centrífugas, se graficaron 5 perfiles de color para cada máquina, uno para cada capacidad de carga de las máquinas, utilizando el promedio de tres corridas realizadas para cada caso. Se estimó la varianza y la desviación estándar, para verificar y disminuir la probabilidad de errores sobredimensionados que descarten la credibilidad de los ensayos.

En términos generales las cuatro centrífugas instaladas presentaron comportamientos similares con desviaciones muy pequeñas en los comportamientos esperados. Cuando se incrementa el tiempo de lavado para una misma capacidad de carga la tendencia del color es a disminuir, el grado de disminución del color es relativo a la carga que se esté manejando.

Gráficamente se ha encontrado que el comportamiento del perfil de color para cada capacidad de carga tiende a un límite asintótico al ir incrementando el tiempo de lavado, por eso se han representado mediante relaciones logarítmicas tomando en cuenta que también son las de este tipo las que mejor correlacionan los datos, de acuerdo al coeficiente R^2 . Teóricamente según los estudios presentados por los proveedores del equipo de medición en línea es logarítmica la tendencia del comportamiento esperada.

Para las cargas bajas, es decir de 4,0 (67 %) y 4,5 (75 %), la reducción de color se encuentra entre 2 y 3 unidades por segundo incrementado, debido al color inherente del cristal y que no puede ser removido sin que el grano se disuelva totalmente.

Para la carga intermedia baja de 5,0 (83 %) la remoción de color presenta rangos de hasta 6 unidades pero en unos casos unos pequeños rangos de 2 unidades cuando el tiempo de lavado se vuelve máximo, debido a que se alcanzan nuevamente colores bajos, en los cuales continuar removiendo es más difícil, porque se trata ya del color ocluido del cristal.

En esta misma secuencia, para las cargas de 5,5 (92 %) y 6,0 (100 %) se observa un incremento significativo en la escala del color manejada dentro de rango para la carga de 5,0, ya que para tiempos de lavado cortos se tienen colores por arriba del límite superior establecido. También se hace notar la mayor remoción de color por segundo al resaltar en los perfiles obtenidos, las pendientes más pronunciadas en todas las máquinas para las capacidades de carga de 5,5, sin dejar de presentarse la reducción de la remoción al irse encarando el perfil al último segundo graficado.

De todos los perfiles detallados, el que mejor se ajusta a los parámetros de operación es el de capacidad de carga 5,0 (83 %), ya que mantiene todos sus puntos dentro del rango de control. Es necesario considerar que el cambio de color mayor es de 5 unidades, por lo cual se debe intentar mantener la operación de las máquinas en los tiempos de lavados más bajos, ya que no se aportará una remoción de color mayor a esta por unidad de tiempo. Mientras que el perfil que mayor remoción presenta en las máquinas No. 1 y No. 2 es el de capacidad de carga 6 (100 %), y para las máquinas No. 4 y No. 5 es el de capacidad de carga de 5,5 (92 %).

Con las curvas de los perfiles definidas y especificadas, se puede programar una trayectoria de trabajo para las máquinas a lo largo de estos, dependiendo de la medición de color del instrumento en línea, el cual sería el

punto de partida, y una programación automática deberá ajustar el trabajo de acuerdo a uno de los cinco perfiles graficados.

Para determinar cual de las 4 máquinas centrífugas presenta colores más bajos de azúcar refino, se procedió a evaluar mediante un análisis gráfico comparando las 4 máquinas para una misma capacidad de carga, obteniendo que para la carga de 4,0 (67 %) los mejores colores se presentan en la centrífuga No. 1 ubicada en uno de los extremos. Para la capacidad de carga No. 4,5 (75 %) la máquina No. 4 presenta la mayor remoción de color. Para la carga de máquina No. 4,5 (83 %) la mayor remoción de color se presenta en la centrífuga No. 5 localizada en otro de los extremos. Subiendo la capacidad de carga a 5,5 (92 %) y a 6,0 (100 %) la menor remoción de color se presenta en la centrífuga No. 1.

Teniendo presente que las diferencia entre los resultados de color para cada máquina a la misma carga tienen un rango mayor de 6 unidades y en una sola ocasión, se puede considerar que no existe motivo para contrastar el trabajo de una con el de las otras, ya que para todos los casos, los mejores resultados se presentan en ocasiones diferentes para todas las máquinas.

Para la comparación de los datos de color medidos en línea y los datos de color medidos en laboratorio, se plotearon los datos en línea en función de los medidos en laboratorio obteniendo una correlación lineal con un coeficiente de correlación del 94 % y un factor de 1,1446 veces el dato de color en línea para representar el color de laboratorio con una diferencia de 0,0476 unidades en el dato final, esta correlación se presenta en la tabla XVI de los resultados. Para dichos cálculos se utilizaron todos los datos de zafra obtenidos por el sistema de control y el laboratorio de control de calidad.

Con la correlación obtenida, se puede otorgar mayor confiabilidad al dato medido en línea, ya que se puede llevar a cabo el cálculo inmediato del color real y tomar decisiones con base a este, sin necesidad de utilizar únicamente el dato de laboratorio. Se debe tener presente que el sistema de medición en línea requiere de una calibración periódica, de lo contrario la correlación obtenida no aplica a las condiciones del aparato, ya que las condiciones no serían iguales a las manejadas durante la investigación.

Como parte del experimento se intentó mantener la operación lo más estable posible, por lo cual se analizaron y utilizaron varias acciones operativas que involucran el área de tachos, el área de centrífugas y el área de secadora descritas previamente. Estas acciones se presentan en la tabla XVII, y se probaron y se ejecutaron durante la experimentación, se limitan a propuestas debido a que la decisión de implementarlas como procedimientos finales específicos y caracterizados cae en responsabilidad de la gerencia de producción.

Estas propuestas se dividen en acciones para los casos cuando la medición de color es por debajo del límite inferior de control establecido y cuando la medición de color es por arriba del límite superior. Estas acciones no se aplicaron y no se deben aplicar tras mediciones puntuales e instantáneas, si no en casos de series de mediciones como en el caso de un batch de cada máquina, es decir, cuatro descargas seguidas que provoquen alerta en el sistema de control de la estación.

Para el caso de análisis de las propiedades del jarabe que se obtiene como coproducto, se encontró un incremento en las propiedades que indican presencia de azúcar en el mismo, es decir, hay incremento de la cantidad de azúcar disuelta y por ende también incremento del color. Por lo anterior, se

debe realizar un ajuste a la relación jarabe/licor para mantener las propiedades de las templeas que alimentan la estación de centrifugas y mantener la estabilidad y continuidad, en los casos cuando se presenten aumentos de color exagerados que no puedan ser contrarrestados, y no por aumentos leves.

En el caso del Brix, el jarabe mostró que no se tiene un incremento significativo, ya que de los 10 segundos a los 13 segundos se tiene un cambio de únicamente 0,80 grados Brix, mientras que para la pol se tiene un incremento de 0,50. Lo anterior se debe a que las masas cocidas se mantuvieron bajo parámetros de control aceptables, al igual que las propiedades constantes del agua de lavado (presión, temperatura) por lo cual la variación dentro de parámetros previos y los de la estación, no afecta de manera excesiva el coproducto y propicia la continuidad y estabilidad de la operación

CONCLUSIONES

1. Para cada máquina centrífuga y cada capacidad de carga de diseño, se elaboró el perfil de color, relacionando los datos de color obtenidos en línea con la duración del tiempo de lavado del ciclo de centrifugación, encontrando que el perfil óptimo de trabajo se consigue al mantener la capacidad de carga de la máquina en 5,0 (83 %).
2. Relacionando los datos de color de la medición en línea y los datos obtenidos por la medición de laboratorio de gestión de calidad, se encontró que la ecuación que representa la relación entre ambos, es lineal con un coeficiente de correlación del 94 %.
3. Las cuatro máquinas centrifugas presentan condiciones de reducción de color similares para una misma masa cocida, dentro de los parámetros de control definidos, de tal manera, ni una presenta una remoción de color significativa en comparación con las otras.
4. Para los casos en los cuales el medidor de color en línea detecte parámetros de control por debajo del límite inferior y por encima del límite superior, se elaboró un listado de 12 acciones operativas destinadas a propiciar la continuidad y estabilidad del proceso. Dichas acciones involucran las estaciones de tachos, centrifugas y secadora.

5. Se evaluó la influencia de la variación de los tiempos de lavado sobre jarabe obtenido de la estación de centrifugas, encontrando que la relación del contenido de sacarosa en el jarabe es proporcional al aumento del tiempo en el lavado, es decir, para una mayor aplicación de agua a presión y temperatura constante, se tiene una mayor concentración de sacarosa disuelta en el jarabe.

RECOMENDACIONES

1. Se debe automatizar el tiempo de lavado en función del perfil de color obtenido para una carga de 5,0 (83 %) para las cuatro centrífugas, buscando ajustarse a la correlación obtenida, a manera de hacer lo más cercano posible el comportamiento real del perfil con el obtenido en la investigación.
2. Realizar un estudio complementario para evaluar el beneficio económico que presenta la optimización en el control de área de centrífugas por reducción de pérdidas de azúcar disuelta, tiempos muertos y disminución del producto no conforme.
3. Llevar a cabo estudios de optimización para las estaciones de proceso posteriores a la de centrífugas, para extender el alcance de las medidas operativas propuestas y que sean enfocadas en los mismos objetivos, o relacionados, poniendo por escrito en los formatos de procedimiento establecidos.
4. Elaborar un programa de calibración del medidor en línea, verificar la limpieza de las boquillas de inyección de agua, así como la presión y temperatura de la misma para asegurar que el trabajo automático se ajuste realmente a los modelos encontrados.

5. Debido a los altos valores de Brix obtenidos en todas las pruebas, se debe considerar la dilución del jarabe que se está reprocessando, para evitar problemas operativos en la elaboración de masas en los tachos y taponamientos en las tuberías por deposición, se debe bajar a un Brix de 70, que es el que se utiliza generalmente en las refinerías de otros ingenios.

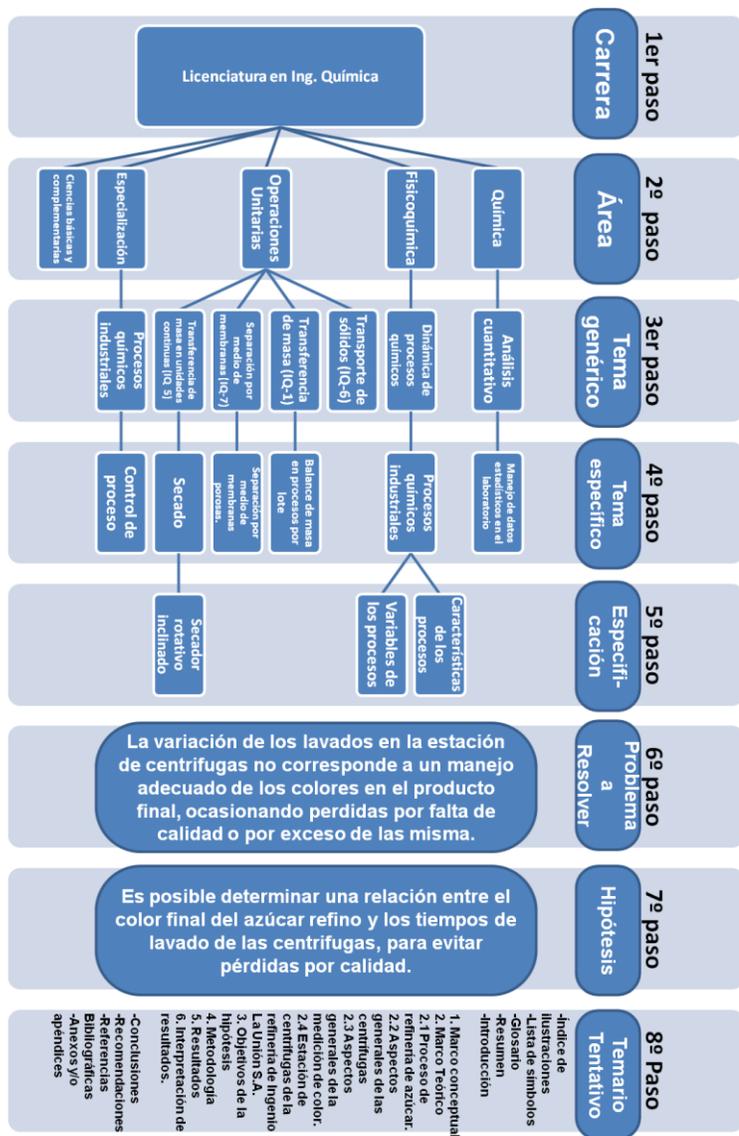
BIBLIOGRAFÍA

1. BIENAIMÉ, L.; NIELSEN, B.C. *White sugar colour in solution: comparison of laboratory and in-line methods*. Proc CITS Conference, Antwerp, Belgium. 1999. p. 465-469.
2. BUCHHOLZ, K.; BRUHNS, M. *The 1994/95 campaign in Germany and new technological developments*. New York: CECSA, 1995. p. 120, 357, 358.
3. CHEN, James C. P. *Manual del azúcar de caña*. México D.F.: Limusa, 1985. 1200 p.
4. CLARKE, M.A. NIELSEN, B.C. *On-line measurement of colour in raw and refined sugars*. Edye LA. 1995. p. 57-62, 68.
5. HONIG, Pieter. *Principios de tecnología azucarera*. New York: CECSA, 1953. 645 p.
6. HUGOT, E. *Handbook of cane sugar*. New York: Elsevier, 1986. 3600 p.
7. JOHNSON, Robert. *Estadística elemental*. México: Trillas, 1984. 515 p.
8. KING, S. Experience and utilisation of an on-line sugar colorimeter in a raw cane mill. *Proc. Int. Soc. Sugar Cane Technol.* 2007. p. 1479-1487.

9. MABILLOT M. Colour measurement in raw and affined sugars. *Proc Sug Ind Tech Inc Conf*, 2000. 21p.
10. MALGOYRE, R.; NIELSEN, B.C.; VERHAEGHE, F. Centrífugal washing optimisation by real-time colour measurement. *Proc Sug Ind Tech Inc Conf*. 1999. 45 p.
11. REIN, Peter; BARTENS KG. *Ingeniería de la caña de azúcar*. Berlin: CECSA, 2012. 487 p.
12. SUHR, M.; AUGUSTINE, G.; KAWLEWSKI, R. *The results of using an inline color analyzer directly after the white centrifugal station*. IIBR/ASSBT Joint Meeting, San Antonio, TX USA, 2007. 15 p.
13. VERLAG, Albert; BARTENS, K.G.; ICUMSA. *Methods book*. Berlin: Elsevier. 2007. 1700 p.

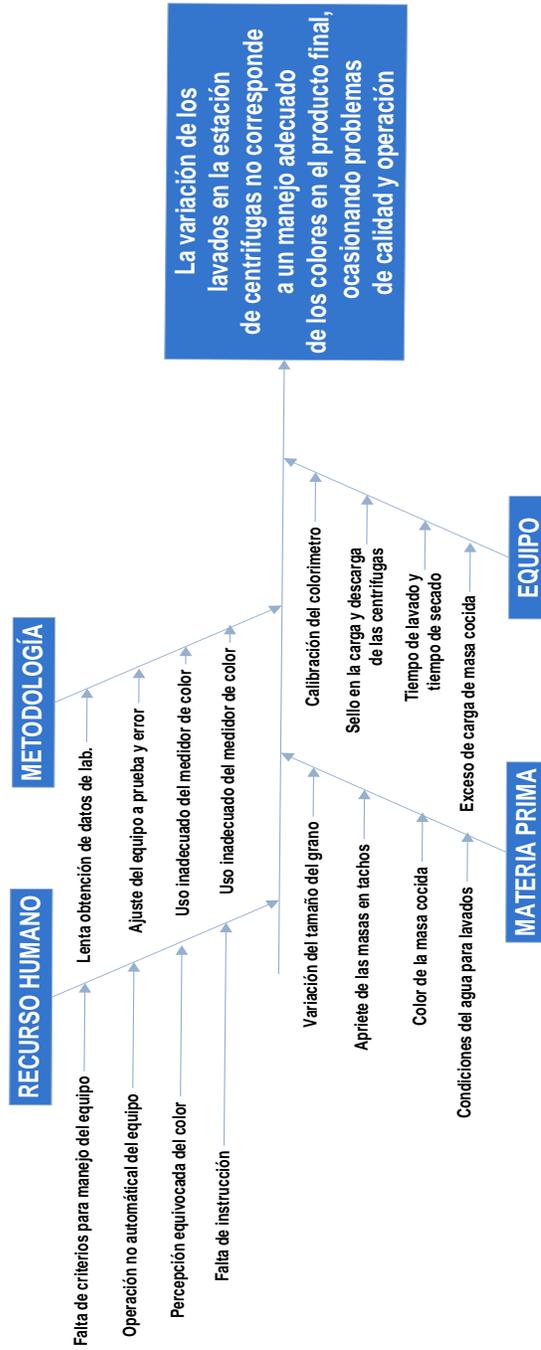
APÉNDICES

Apéndice 1. **Tabla de Requisitos Académicos**



Fuente: elaboración propia

Apéndice 2. Diagrama de Ishikawa



Fuente: elaboración propia

Apéndice 3. Datos calculados

Colores de refino, obtenidos para la centrífuga No. 1 a diferentes capacidades de carga, media, varianza y desviación estándar

Carga 4,0 (67%)						
Tiempo	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3	Media	S ²	S
10	19,8	20,16	19,62	19,90	0,080	0,270
11	18,9	18,54	19,26	18,90	0,130	0,360
12	16,2	16,38	16,56	16,40	0,030	0,180
13	15,3	14,76	14,94	15,00	0,080	0,270
Carga 4,5 (75%)						
Tiempo	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3	Media	S ²	S
10	29,26	29,48	30,14	29,60	0,210	0,460
11	25,52	24,86	24,64	25,00	0,210	0,460
12	20,68	21,56	21,34	21,20	0,210	0,460
13	20,24	20,46	19,80	20,20	0,110	0,340
Carga 5,0 (83%)						
Tiempo	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3	Media	S ²	S
10	33,63	34,58	33,44	33,90	0,370	0,610
11	32,49	31,54	32,11	32,00	0,230	0,480
12	28,70	28,80	27,90	28,50	0,240	0,490
13	26,00	26,10	27,50	26,50	0,700	0,840
Carga 5,5 (92%)						
Tiempo	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3	Media	S ²	S
10	39,38	39,82	39,60	39,60	0,050	0,220
11	37,40	37,62	37,84	37,60	0,050	0,220
12	31,68	32,12	30,58	31,50	0,630	0,790
13	30,36	30,58	29,92	30,30	0,110	0,340
Carga 6,0 (100%)						
Tiempo	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3	Media	S ²	S
10	43,68	44,16	44,40	44,10	0,090	0,370
11	42,96	39,36	40,80	41,00	2,190	1,810
12	36,72	33,84	36,00	35,50	1,500	1,500
13	35,76	33,84	34,08	34,60	0,730	1,050

Fuente: Elaboración propia.

**Colores de refino, obtenidos para la centrífuga No. 2 a diferentes
capacidades de carga, media, varianza y desviación estándar**

Carga 4.0 (67%)						
Tiempo	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3	Media	S ²	S
10	21,96	21,78	22,32	22,00	0,080	0,270
11	21,06	20,34	20,88	20,80	0,140	0,370
12	15,84	16,56	16,02	16,10	0,140	0,370
13	15,48	15,30	15,48	15,40	0,010	0,100
Carga 4.5 (75%)						
Tiempo	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3	Media	S ²	S
10	28,16	29,92	29,26	29,10	0,790	0,890
11	25,96	26,40	26,62	26,30	0,110	0,340
12	21,12	21,34	20,90	21,10	0,050	0,220
13	19,80	20,24	20,02	20,00	0,050	0,220
Carga 5.0 (83%)						
Tiempo	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3	Media	S ²	S
10	33,06	33,82	34,20	33,70	0,340	0,580
11	32,30	32,68	32,87	32,60	0,080	0,290
12	28,70	28,80	27,90	28,50	0,240	0,490
13	26,00	26,10	27,50	26,50	0,700	0,840
Carga 5.5 (92%)						
Tiempo	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3	Media	S ²	S
10	40,26	40,04	40,04	40,10	0,020	0,130
11	39,38	38,94	39,16	39,20	0,050	0,220
12	33,00	33,44	32,56	33,00	0,190	0,440
13	30,58	31,24	31,02	30,90	0,110	0,340
Carga 6.0 (100%)						
Tiempo	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3	Media	S ²	S
10	44,64	43,92	44,16	44,20	0,130	0,370
11	38,40	41,52	40,56	40,20	2,550	1,600
12	38,16	33,36	34,56	35,40	6,240	2,500
13	34,08	31,92	33,12	33,00	1,170	1,080

Fuente: elaboración propia.

Colores de refino, obtenidos para la centrífuga No. 4 a diferentes capacidades de carga, media, varianza y desviación estándar

Carga 4.0 (67%)						
Tiempo	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3	Media	S ²	S
10	21,96	21,78	22,32	22,00	0,080	0,270
11	21,06	20,34	20,88	20,80	0,140	0,720
12	15,84	16,56	16,02	16,10	0,140	0,520
13	15,48	15,30	15,48	15,40	0,010	0,360
Carga 4.5 (75%)						
Tiempo	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3	Media	S ²	S
10	28,16	29,92	29,26	29,10	0,790	0,220
11	25,96	26,40	26,62	26,30	0,110	0,460
12	21,12	21,34	20,90	21,10	0,050	0,440
13	19,80	20,24	20,02	20,00	0,050	0,000
Carga 5.0 (83%)						
Tiempo	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3	Media	S ²	S
10	33,06	33,82	34,20	33,70	0,340	0,400
11	32,30	32,68	32,87	32,60	0,080	0,480
12	28,70	28,80	27,90	28,50	0,240	0,490
13	26,00	26,10	27,50	26,50	0,700	0,840
Carga 5.5 (92%)						
Tiempo	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3	Media	S ²	S
10	40,26	40,04	40,04	40,10	0,020	0,340
11	39,38	38,94	39,16	39,20	0,050	0,340
12	33,00	33,44	32,56	33,00	0,190	0,460
13	30,58	31,24	31,02	30,90	0,110	0,340
Carga 6.0 (100%)						
Tiempo	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3	Media	S ²	S
10	44,64	43,92	44,16	44,2	0,130	0,600
11	38,4	41,52	40,56	40,2	2,550	0,870
12	38,16	33,36	34,56	35,4	6,240	1,000
13	34,08	31,92	33,12	33,0	1,170	1,360

Fuente: elaboración propia.

**Colores de refino, obtenidos para la centrífuga No. 5 a diferentes
capacidades de carga, media, varianza y desviación estándar**

Carga 4.0 (67%)						
Tiempo	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3	Media	S ²	S
10	21,96	21,78	22,32	22,00	0,080	0,810
11	21,06	20,34	20,88	20,80	0,140	0,360
12	15,84	16,56	16,02	16,10	0,140	0,450
13	15,48	15,30	15,48	15,40	0,010	0,540
Carga 4.5 (75%)						
Tiempo	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3	Media	S ²	S
10	28,16	29,92	29,26	29,10	0,790	0,220
11	25,96	26,40	26,62	26,30	0,110	0,440
12	21,12	21,34	20,90	21,10	0,050	0,340
13	19,80	20,24	20,02	20,00	0,050	0,460
Carga 5.0 (83%)						
Tiempo	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3	Media	S ²	S
10	33,06	33,82	34,20	33,70	0,340	0,290
11	32,30	32,68	32,87	32,60	0,080	0,190
12	28,70	28,80	27,90	28,50	0,240	0,490
13	26,00	26,10	27,50	26,50	0,700	0,840
Carga 5.5 (92%)						
Tiempo	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3	Media	S ²	S
10	40,26	40,04	40,04	40,10	0,020	1,370
11	39,38	38,94	39,16	39,20	0,050	0,440
12	33,00	33,44	32,56	33,00	0,190	0,220
13	30,58	31,24	31,02	30,90	0,110	0,340
Carga 6.0 (100%)						
Tiempo	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3	Media	S ²	S
10	44,64	43,92	44,16	44,20	0,130	0,240
11	38,40	41,52	40,56	40,20	2,550	0,370
12	38,16	33,36	34,56	35,40	6,240	0,280
13	34,08	31,92	33,12	33,00	1,170	0,630

Fuente: elaboración propia.

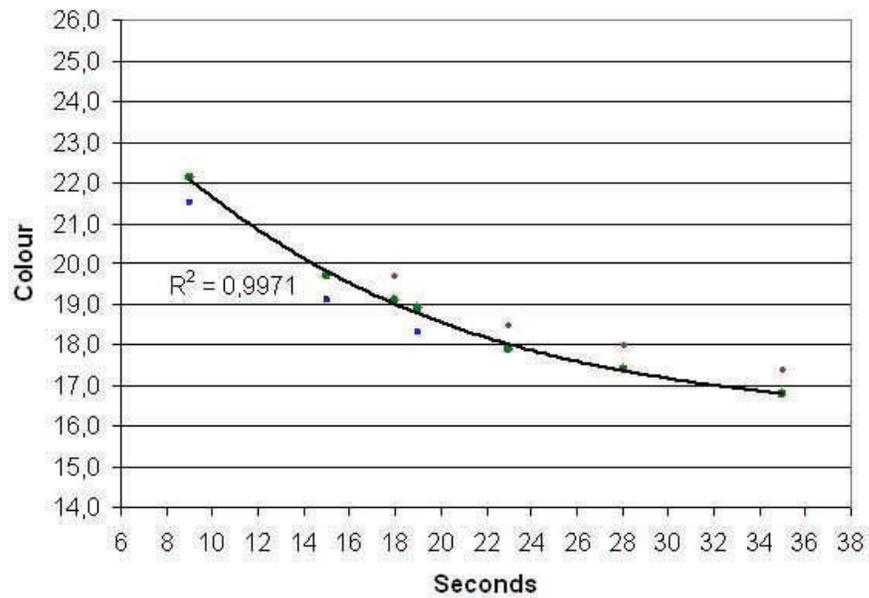
Colores de jarabe obtenidos al variar los tiempos de lavado, media, varianza y desviación estándar

Carga 4.0 (67%)						
Tiempo	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3	Media	S ²	S
10	1 690	1 724	1 712	1 709	296	17
11	1 659	1 703	1 715	1 692	873	30
12	1 705	1 710	1 800	1 738	2 858	53
13	1 685	1 695	1 725	1 702	433	21
Carga 4.5 (75%)						
Tiempo	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3	Media	S ²	S
10	1 908	1 879	1 888	1 892	220	15
11	1 885	1 891	1 903	1 893	85	9
12	1 865	1 817	1 847	1 843	598	24
13	1 797	1 842	1 840	1 826	650	26
Carga 5.0 (83%)						
Tiempo	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3	Media	S ²	S
10	1 840	1 869	1 815	1 841	712	27
11	1 811	1 844	1 882	1 846	1 262	36
12	1 813	1 891	1 838	1 847	1 586	40
13	1 897	1 833	1 868	1 866	1 027	32
Carga 5.5 (92%)						
Tiempo	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3	Media	S ²	S
10	1 925	1 960	1 975	1 953	658	26
11	1 925	1 948	1 900	1 924	576	24
12	1 910	1 903	1 951	1 921	672	26
13	1 890	1 940	1 888	1 906	862	29
Carga 6.0 (100%)						
Tiempo	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3	Media	S ²	S
10	2 019	2 005	2 047	2 024	457	21
11	1 986	2 051	2 033	2 023	1 137	34
12	1 994	2 100	1 976	2 023	4 504	67
13	1 961	1 997	1 893	1 950	2 812	53

Fuente: elaboración propia.

ANEXOS

Anexo 1. **Comportamiento teórico del perfil de color de la estación de centrífugas, según proveedor de colorímetro en línea**



Fuente: Nielsen. On-line measurement of colour in raw and refined sugars. P.13

Anexo 2. Parámetros de control a tomar en cuenta en la estación de centrífugas de la refinería de Ingenio La Unión S.A.

Parámetro	Rango
Color de masa cocida	750 – 1 000- 1 250 UI
Tamaño de grano	515 – 600 – 685 µm
Coefficiente de variación del grano	28 – 33 – 38 %
Color de grano centrifugado	20 – 30 – 40 UI
Tiempo de lavado	10 – 13 s

Fuente: Registros Ingenio La Unión S.A.

Anexo 3. Requisitos en los parámetros del azúcar refinado

Parámetro	Rango
Polarización	99,2– 99,4-99,8 S
Color	25 – 30 – 35 UI
Humedad granulado (m/m)	0,04% máximo
Cenizas (m/m)	0,04% máximo

Fuente: Registros Ingenio La Unión S.A.