



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

**OPTIMIZACIÓN DE LA EFICIENCIA DE LAS CENTRÍFUGAS EN LA  
ESTACIÓN “B DE CRUDO”, MEDIANTE EL USO DE LA LÁMPARA  
ESTROBOSCÓPICA TKRS Y EL MICROSCOPIO MORPHOLOGI G3,  
A PARTIR DE LA ZAFRA 2014-2015 DEL INGENIO LA UNIÓN**

**Lisbeth Mariela Samayoa Bernal**

Asesorado por la Inga. Vivianne Patricia Ruiz Valenzuela  
Coasesorado por el Ing. Ramiro Rafael Cifuentes de León

Guatemala, agosto de 2015

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**OPTIMIZACIÓN DE LA EFICIENCIA DE LAS CENTRÍFUGAS EN LA ESTACIÓN “B DE CRUDO”, MEDIANTE EL USO DE LA LÁMPARA ESTROBOSCÓPICA TKRS Y EL MICROSCOPIO MORPHOLOGI G3, A PARTIR DE LA ZAFRA 2014-2015 DEL INGENIO LA UNIÓN**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**LISBETH MARIELA SAMAYOA BERNAL**

ASESORADO POR LA INGA. VIVIANNE PATRICIA RUIZ VALENZUELA  
COASESORADO POR EL ING. RAMIRO RAFAEL CIFUENTES DE LEÓN

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERA QUÍMICA**

GUATEMALA, AGOSTO DE 2015

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Narda Lucía Pacay Barrientos
VOCAL V	Br. Walter Rafael Véliz Muñoz
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

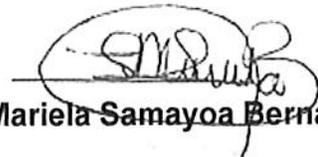
DECANO	Ing. Angel Roberto Sic García
EXAMINADOR	Ing. Otto Raúl de León de Paz
EXAMINADOR	Ing. César Ariel Villela Rodas
EXAMINADOR	Ing. Adrián Antonio Soberanis Ibañez
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

## HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

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

**OPTIMIZACIÓN DE LA EFICIENCIA DE LAS CENTRÍFUGAS EN LA ESTACIÓN "B DE CRUDO", MEDIANTE EL USO DE LA LÁMPARA ESTROBOSCÓPICA TKRS Y EL MICROSCOPIO MORPHOLOGI G3, A PARTIR DE LA ZAFRA 2014-2015 DEL INGENIO LA UNIÓN**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha 18 de noviembre de 2014.



**Lisbeth Mariela Samayoa Bernal**

Guatemala 6 de mayo de 2015

Ingeniero Victor Monzón  
Universidad de San Carlos de Guatemala  
Escuela de Ingeniería Química

Presente

Por este medio informo a usted que asesoré a la alumna Lisbeth Mariela Samayoa Bernal, quien se identifica con el carné 2011-13980 en su investigación de tesis, la cual recibe el nombre de **OPTIMIZACIÓN DE LA EFICIENCIA DE LAS CENTRÍFUGAS EN LA ESTACIÓN "B DE CRUDO", MEDIANTE EL USO DE LA LÁMPARA ESTROBOSCÓPICA TKRS Y EL MICROSCOPIO MORPHOLOGI G3, A PARTIR DE LA ZAFRA 2014-2015 DEL INGENIO LA UNIÓN**, el cual se llevó a cabo dentro del área de fabricación del Ingenio la Unión.

Sin otro particular



Inga. Qca. Vivianne Patricia Ruiz Valenzuela

No. Colegiada 1225

*Vivianne Patricia Ruiz Valenzuela*  
INGENIERA QUIMICA  
Colegiado No. 1225



Guatemala, 18 de noviembre de 2014  
Ref. EIQ.TG-DI.079.2014

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

Estimado Ingeniero Monzón:

Como consta en el Registro de Evaluación del diseño de investigación EIQ-REG-TG-002, correlativo **093-2014**, le informo que reunidos los Miembros de la Terna nombrada por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del:

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DE TRABAJO DE GRADUACIÓN**  
**-Modalidad Seminario de Investigación-**

Solicitado por la estudiante universitaria: **Lisbeth Mariela Samayo Bernal**.  
Identificada con número de carné: **2011-13980**.  
Previo a optar al título de **INGENIERA QUÍMICA**.

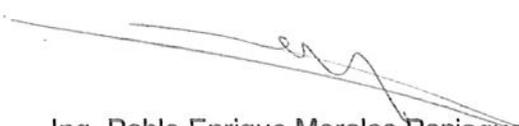
Siguiendo los procedimientos de revisión interna de la Escuela de Ingeniería Química, los Miembros de la Terna han procedido a **APROBARLO** con el siguiente título:

**OPTIMIZACIÓN DE LA EFICIENCIA DE LAS CENTRÍFUGAS DE LA ESTACIÓN**  
**"B DE CRUDO" MEDIANTE EL USO DE LA LÁMPARA ESTROBOSCÓPICA**  
**TKRS Y EL MICROSCOPIO MORFOLOGI G3, A PARTIR DE LA ZAFRA 2014-**  
**2015 DEL INGENIO LA UNIÓN**

El Trabajo de Graduación es asesorado por la Ingeniera Química: **Vivianne Patricia Ruíz Valenzuela**.

Se autoriza al estudiante, proceder con la fase de ejecución del proyecto de investigación, del trabajo de graduación de acuerdo al cronograma aprobado.

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"

  
Ing. Pablo Enrique Morales Paniagua  
COORDINADOR DE TERNA  
Tribunal de Revisión  
Trabajo de Graduación



C.c.: archivo





Ref.EIQ.TG.114.2015

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 de la estudiante, **LISBETH MARIELA SAMAYOA BERNAL** titulado: **"OPTIMIZACIÓN DE LA EFICIENCIA DE LAS CENTRÍFUGAS EN LA ESTACIÓN "B DE CRUDO", MEDIANTE EL USO DE LA LÁMPARA ESTROBOSCÓPICA TKRS Y EL MICROSCOPIO MORFOLOGI G3, A PARTIR DE LA ZAFRA 2014-2015 DEL INGENIO LA UNIÓN"**. Procede a la autorización del mismo, ya que reúne el rigor, la secuencia, la pertinencia y la coherencia metodológica requerida.

*"Id y Enseñad a Todos"*

Ing. Víctor Manuel Monzón Valdez  
DIRECTOR  
Escuela de Ingeniería Química



Guatemala, agosto 2015

Cc: Archivo  
VMMV/ale



Agencia Centroamericana de Acreditación de  
Instituciones de Educación Superior





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: **OPTIMIZACIÓN DE LA EFICIENCIA DE LAS CENTRÍFUGAS EN LA ESTACIÓN "B DE CRUDO", MEDIANTE EL USO DE LA LÁMPARA ESTROBOSCÓPICA TKRS Y EL MICROSCOPIO MORPHOLOGI G3, A PARTIR DE LA ZAFRA 2014-2015 DEL INGENIO LA UNIÓN,** presentado por la estudiante universitaria: **Lisbeth Mariela Samayoa Bernal,** y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

  
Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco  
Decano

Guatemala, 28 de agosto de 2015

/gdech



## **ACTO QUE DEDICO A:**

- Dios** Por ser el pilar fundamental de mi vida, por ser mi amigo y mi guía en todo momento y porque sin Él nada sería posible.
- Virgen María** Por interceder por mí, guiarme y por ser mi ejemplo a seguir.
- Mis padres** Lic. Esaú Jonathan Samayoa González y Licda. Berta Edith Bernal Arévalo de Samayoa, por su apoyo, sacrificio y amor incondicional. Por transmitirme valores a través de su ejemplo.
- Mis hermanos** Karen Edith y Luis Fernando Samayoa Bernal, por el apoyo que me han brindado, por ser amigos y porque sé que cuento con ellos en las buenas y en las malas.

## **AGRADECIMIENTOS A:**

### **Mi madre**

Licda. Berta Edith Bernal Arévalo de Samayoa, por haberme brindado su amor, apoyo y comprensión incondicionales, por ser mi amiga, confidente, mi ejemplo de vida y por enseñarme a vivir.

### **Mi padre**

Lic. Esaú Jonathan Samayoa González, por haberme brindado su amor, apoyo, comprensión, por sus consejos, por alentarme a ser una mujer profesional de éxito, por ser mi ejemplo de vida y por enseñarme a vivir.

### **Mi hermana**

Karen Edith Samayoa Bernal, por haberme brindado su apoyo y amor incondicionales, por inyectarme optimismo y alegría en los momentos difíciles, por ser mi confidente y amiga.

### **Mi hermano**

Luis Fernando Samayoa Bernal, por brindarme su apoyo y amor incondicionales, y tenderme la mano a lo largo de mi formación profesional, por ser mi amigo.

**Mi tío**

Lic. Rogelio Bernal Arévalo, por estar pendiente de mí en todo momento y por su apoyo incondicional.

**Selvyin Aldair  
Solórzano**

Por su apoyo, comprensión y paciencia a lo largo de mi formación profesional, por ser mi amigo desde el primer semestre hasta el día de hoy y porque sin su apoyo, hubiera sido difícil llegar a la meta.

**Carolina Herrera  
Rosales**

Por su apoyo, comprensión y paciencia a lo largo de mi formación profesional, por estar a mi lado en los momentos difíciles, ser mi amiga y acompañarme en las nuevas metas trazadas.

**Compañeros y amigos**

Por su apoyo, cariño y paciencia a lo largo de mi formación profesional.

**Universidad de San  
Carlos de Guatemala**

En especial a la Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Química, por haberme permitido realizar mi formación profesional.

**Mi asesora**

Inga. Vivianne Ruiz, por brindarme su apoyo y ayuda, por su amistad y por las experiencias compartidas.

## **Ingenio La Unión**

Especialmente a: Ing. Jorge Sandoval, Ing. Elfego Bautista, Ing. Mynor Estrada, Ing. Víctor Linares, Ing. Ramiro Cifuentes, Ing. Estiven Recinos y colaboradores del área de Recuperación de Sacarosa, por permitirme vivir una de las mejores experiencias de mi formación profesional, por el apoyo brindado y haber sido parte fundamental para la realización de este proyecto.

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES .....	V
LISTA DE SÍMBOLOS .....	VII
GLOSARIO .....	IX
RESUMEN .....	XI
OBJETIVOS .....	XIII
Hipótesis .....	XIV
INTRODUCCIÓN .....	XV
1.    MARCO CONCEPTUAL .....	1
1.1.    Antecedentes .....	1
1.2.    Justificación .....	3
1.3.    Determinación del problema .....	4
1.3.1.    Definición .....	4
1.3.2.    Delimitación .....	4
2.    MARCO TEÓRICO .....	5
2.1.    Centrífugas .....	5
2.2.    Centrífugas continuas .....	6
2.2.1.    Partes de una centrífuga continua .....	8
2.2.1.1.    Carcasa .....	8
2.2.1.2.    Canasta .....	8
2.2.1.3.    Tela de soporte y tela de trabajo .....	8
2.2.1.4.    Dispositivo de alimentación .....	9
2.2.1.5.    Sistema de lavado .....	9
2.2.1.6.    Compartimiento de mieles .....	9

	2.2.1.7.	Soporte .....	9
	2.2.1.8.	Movimiento .....	10
	2.2.2.	Datos específicos de una centrífuga continua BMA .....	10
2.3.		Microscopio Morphologi G3.....	11
	2.3.1.	Dispersión en seco .....	11
	2.3.2.	Emulsiones y suspensiones .....	11
	2.3.3.	Diagrama de dispersión o clasificación .....	11
	2.3.4.	SOP.....	12
	2.3.5.	Morphologi G3 ID .....	12
2.4.		Lámpara estroboscópica .....	13
3.		METODOLOGÍA .....	15
	3.1.	Variables .....	15
	3.2.	Delimitación del campo de estudio .....	16
	3.2.1.	Campo de estudio .....	16
	3.2.2.	Etapas que conforman la investigación .....	16
	3.2.3.	Ubicación del desarrollo de la investigación .....	16
	3.3.	Recursos humanos disponibles.....	16
	3.3.1.	Investigador.....	17
	3.3.2.	Asesor .....	17
	3.3.3.	Coasesor .....	17
	3.4.	Recursos materiales disponibles.....	17
	3.4.1.	Equipo .....	17
	3.4.2.	Materia prima .....	18
	3.4.3.	Equipo de medición .....	18
	3.5.	Técnica cuantitativa.....	18
	3.5.1.	Evaluación del comportamiento de la estación de centrífugas “B de crudo” .....	19

3.6.	Recolección y ordenamiento de la información .....	21
3.6.1.	Análisis del proceso de centrifugación .....	21
3.6.2.	Recolección de los datos experimentales .....	21
3.6.3.	Evaluación de las características del proceso .....	21
3.7.	Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información .....	22
3.7.1.	Primera opción.....	23
3.7.2.	Segunda opción .....	25
3.7.3.	Medidas de dispersión .....	26
3.7.3.1.	Varianza.....	26
3.7.3.2.	Desviación estándar.....	27
3.7.3.3.	Análisis de varianza (ANOVA).....	27
3.7.4.	Programas para el análisis de datos .....	28
4.	RESULTADOS.....	29
5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	39
	CONCLUSIONES.....	41
	RECOMENDACIONES.....	43
	BIBLIOGRAFÍA.....	45
	APÉNDICES.....	47
	ANEXOS .....	55



## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1.	Centrífuga continua.....	7
2.	Microscopio Morphologi G3.....	12
3.	Lámpara estroboscópica TKRS 20.....	14
4.	Diagrama de flujo general del procedimiento .....	20
5.	Pureza de la miel en centrífugas 4 y 5, sin variar el proceso .....	29
6.	Pureza de la miel en centrífugas 4 y 5, variando el proceso.....	30
7.	Diferencia de pureza miel Nustch-Centrífuga 4 y 5, sin variar el proceso .....	30
8.	Diferencia de pureza miel Nustch-Centrífuga 4 y 5, variando el proceso .....	31
9.	Agotamiento, sin variaciones al proceso .....	31
10.	Agotamiento, con variaciones al proceso .....	32
11.	Pureza del azúcar en centrífugas 4 y 5, variando el proceso .....	32
12.	Porcentaje de recuperación de sólidos en Centrífugas 4 y 5, variando el proceso.....	33
13.	Promedio de factor de carga por nivel.....	35
14.	Promedio por factor de flujo de agua por nivel .....	36
15.	Promedio por factor de carga por nivel.....	36

### TABLAS

I.	Datos específicos para las centrífugas continuas BMA de los modelos K2200, K2300, K2400 y K2500.....	10
----	--	----

II.	Definición operacional y descripción de las variables independientes .....	15
III.	Definición de variables respuesta .....	15
IV.	Factores y sus niveles .....	23
V.	Matriz de experimentos .....	24
VI.	Sustitución de valores en matriz de experimentos .....	24
VII.	Factores y sus niveles .....	25
VIII.	Matriz de experimentos .....	25
IX.	Sustitución de valores en matriz de experimentos .....	26
X.	Ecuaciones sumas de cuadrados .....	27
XI.	Selección de la corrida con mejores resultados .....	34
XII.	Punto óptimo de cada factor en la mejor corrida .....	34
XIII.	Promedios por factor .....	35
XIV.	Análisis de varianza .....	37

## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
<b>Cr</b>	Carga (A°)
<b>C</b>	Dispositivo de carga
<b>D</b>	Distribución flujo de agua (L/h)
<b>A</b>	Flujo de agua (L/h)
<b>%CV</b>	Porcentaje de variación del tamaño del grano (%)
<b>P</b>	Porta-toberas
<b>V</b>	Presión de vapor (Psig)
<b>y<sub>i</sub></b>	Promedio total de las observaciones bajo el i,j-esimo tratamiento.
<b>SSE</b>	Suma de cuadrados de error
<b>SSA</b>	Suma de cuadrados de tratamiento
<b>SST</b>	Suma total de cuadrados
<b>Y<sub>ij</sub></b>	Total de observaciones bajo el i,j-esimo tratamiento



## GLOSARIO

<b>Agotamiento</b>	Aplicado a la masa cocida. Representa los granos de sacarosa presentes en forma cristalina para cada 100 gramos de sacarosa.
<b>Azúcar crudo</b>	Azúcar moreno producido en las fábricas de azúcar. Generalmente destinado a procesos posteriores en refinерías para obtener azúcar blanco.
<b>Brix</b>	Medida de los sólidos disueltos en azúcar, jugo, licor o jarabe utilizando un refractómetro. También conocido como sólidos secos refractométricos. Para soluciones que contienen únicamente azúcar y agua, Brix=% en masa de azúcar.
<b>Centrífuga</b>	Máquina centrífuga utilizada para separar el azúcar del licor madre o miel.
<b>Contenido de cristales</b>	Proporción en masa del contenido de cristales en la cristales masa cocida, usualmente expresado como porcentaje y referido a la masa total o a la materia seca en la masa cocida (Brix).
<b>Magma</b>	Mezcla de cristales y líquido (agua, jugo clarificado, jarabe o miel), obtenido por medio de un mezclador.

<b>Masa cocida</b>	La mezcla de cristales y licor madre o miel que se obtiene durante el proceso de evapocristalización.
<b>Mezclador de masa</b>	Aparato desde el cual se distribuyen las masas cocidas a las máquinas centrífugas.
<b>Miel</b>	Licor madre que se separa de los cristales mediante la centrifugación.
<b>Polarización o Pol</b>	Contenido de sacarosa aparente expresado como porcentaje de masa, medido a partir de la rotación óptica de luz polarizada al pasar por una solución azucarada. Este procedimiento es exacto únicamente para soluciones de sacarosa puras.
<b>Pureza</b>	Representa el contenido de sacarosa expresado como porcentaje de la sustancia seca o el contenido de sólidos disueltos. Los sólidos comprenden el azúcar y no-sacarosas tales como invertidos, cenizas y elementos colorantes. La pureza aparente se expresa como la polarización dividida por los grados Brix refractométricos, multiplicado por 100.
<b>Sacarosa</b>	El compuesto químico puro $C_{12}H_{22}O_{11}$ que es conocido como azúcar blanco, generalmente medido mediante polarización en caso de soluciones puras.

## RESUMEN

El presente estudio de investigación consistió en la evaluación de las características del proceso de centrifugación de la estación “B de crudo”, llevado a cabo dentro del Ingenio La Unión. El objetivo fue obtener datos reales para mejorar la eficiencia de las centrífugas de esta estación a través del monitoreo constante del proceso, para disminuir los costos de operación y plantear alternativas de solución.

Al inicio de la zafra se observó la manera en que se estaba llevando a cabo esta operación en los tres turnos de trabajo. Se llevó un control de la manera en que los operarios laboran, del tamaño promedio de los cristales obtenidos y de la pureza de la masa, miel y azúcar, para determinar el porcentaje de recuperación de azúcar. También se examinó el estado interno de las centrífugas utilizando la lámpara estroboscópica, la cual dio a conocer el curso del proceso en estado estacionario. Además se verificó que el funcionamiento del equipo se esté llevando a cabo de acuerdo a lo sugerido por los manuales de uso de cada uno de ellos.

Luego se llevó a cabo la variación en el proceso según las variables carga, de flujo de agua y vapor, para realizar una comparación entre los resultados obtenidos entre la operación normal y variada. Se comprobó que el punto óptimo para las centrífugas es de 95 A de carga, 300 L/h de agua y  $\frac{3}{4}$  de la abertura de la válvula de vapor. Por ello se implementaron los cambios necesarios para que la estación funcionara de la mejor manera.

Por último se inició con la estandarización de los procedimientos y se establecieron los lineamientos de operación en los tres turnos en los que trabaja la fábrica para obtener un mejor control de las variables del proceso, y que este sea más estable.

## **OBJETIVOS**

### **General**

Obtener datos reales para mejorar la eficiencia de las centrífugas de la estación “B de crudo” del Ingenio La Unión, a través del monitoreo constante del proceso, para disminuir los costos de operación y plantear alternativas de solución, mediante el uso de la lámpara estroboscópica TKRS y el microscopio morfologi G3, a partir de la zafra 2014-2015.

### **Específicos**

1. Estandarizar los procedimientos para obtener un mejor control de las variables del proceso.
2. Establecer los lineamientos de los procedimientos en los tres turnos de trabajo para obtener un mejor control de las variables dentro del proceso.
3. Disminuir la variación del proceso de centrifugación para que este sea más estable.
4. Verificar que el funcionamiento de la centrífuga se esté llevando a cabo según su manual de uso.

## **Hipótesis**

### **Hipótesis Nula:**

Los cambios en la carga, cantidad de agua y de vapor suministrados a una centrífuga provocan cambios en la cantidad de grano en miel, en comparación a la cantidad actual.

### **Hipótesis Alternativa:**

Los cambios en la carga, cantidad de agua y de vapor suministrados a una centrífuga no provocan cambios en la cantidad de grano en miel, en comparación a la cantidad actual.

## INTRODUCCIÓN

En el Ingenio La Unión se lleva a cabo la fabricación de azúcar. El proceso empieza por la recepción de la caña, y continúa con la preparación de la misma, siguiendo con la extracción de jugos, su tratamiento, evaporación, cristalización, centrifugado, secado y finalizando con el empaque.

Dentro del centrifugado se lleva a cabo la recolección de la melaza. La masa cocida que se llevó al mezclador o cristizador se hace pasar a máquinas giratorias, las cuales son llamadas centrífugas. La canasta tiene sus costados perforados y forrado de telas metálicas, entre el forro y el costado hay láminas de metal.

Las máquinas giran a velocidades entre 1 000 y 1 800 rpm. El forro perforado retiene los cristales de azúcar para que puedan ser lavados con agua si se desea. Las mieles pasan a través del forro, impulsando por la fuerza centrífuga que sobre ellas se ejerce. Cuando el azúcar queda purgado, se descarga de la centrifuga, quedando lista para recibir otra carga de masa cocida.

Dentro del proceso de centrifugado de la estación “B de crudo” del Ingenio La Unión se producen algunas pérdidas de los cristales de azúcar que se quedan disueltos en las mieles. Este problema puede ser causado por distintas variables dentro del proceso, originando grandes pérdidas dentro del ingenio.

Las pérdidas de cristales, causadas por llevar a cabo el proceso de manera incorrecta, provocan inestabilidad en la economía del Ingenio, por lo

que es necesario investigar el por qué de las mismas, para así establecer alternativas de solución y aumentar la eficiencia de la estación.

# **1. MARCO CONCEPTUAL**

## **1.1. Antecedentes**

En la actualidad, la industria azucarera se ha convertido en una de las principales fuentes de empleo para el país, ayudando en la economía guatemalteca. En Guatemala existen doce ingenios y cinco organizaciones que la integran, los cuales contribuyen al desarrollo de más de un millón de personas, constituyendo un factor determinante para el progreso de Guatemala.

El desarrollo de la industria azucarera guatemalteca ha tenido como base fundamental la voluntad de mantener la unidad de sus integrantes, para desarrollar políticas, programas y proyectos en forma conjunta. En Guatemala la producción azucarera siempre ha tenido carácter privado y no ha contado con apoyos externos, ni del Estado, contrario a lo que ha sucedido en la mayoría de los países productores de azúcar.

El azúcar se produce en el campo y se extrae y cristaliza en la fábrica, a través de procesos que involucran diferentes disciplinas profesionales y que, al conjugar esos esfuerzos, el resultado final es el producto que endulza las vidas. El proceso empieza por la recepción de la caña, y continúa con la preparación de la misma, siguiendo con la extracción de jugos, su tratamiento, evaporación, cristalización, centrifugado, secado y finalizando con el empaque.

Dentro del proceso de fabricación existen pérdidas de azúcar desde el inicio hasta el final y esto significa un problema en la eficiencia del mismo. Por ello cada vez los ingenios azucareros realizan investigaciones en las que se llevan a cabo estudios sobre las pérdidas de azúcar en diferentes puntos del proceso.

Uno de los puntos en los que se ha encontrado la mayor pérdida de cristales de azúcar es en el área de centrifugado, donde se obtienen los cristales que vienen de la cristalización. Este problema se ha dado por diferentes causas en el Ingenio La Unión se da en la estación de centrifugas llamada “B de crudo”, donde la eficiencia es baja con respecto a su capacidad. Por ello se desea llevar a cabo un estudio donde se establezcan las causas que provocan la baja eficiencia en dicha estación y se propongan alternativas de solución a esta problemática.

En 2004 Luis Leonardo Cutz Saquimux, estudiante de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala, realizó su trabajo de graduación titulado *Determinación de la pérdida de azúcar por exceso de lavado en una centrífuga semiautomática 1.22m x 0.76m, Ingenio Trinidad, Escuintla, Guatemala*. Él determinó que la mayor parte de pérdida de azúcar se producía en el intervalo de tiempo de 15 a 25 segundos, debido a que la sacarosa es muy soluble en agua, aumentando el azúcar disuelta de cada lote. Esto ocurriría en función del número de solubilidad y al incrementar los tiempos de este aumentaba el porcentaje de recirculación de agua en promedio a 0,0056 m<sup>3</sup>/s equivalente a 67,91 %, redundando en requerimiento de mayor equipo e insumos.

Con base en los resultados obtenidos se estableció que es necesario optimizar el tiempo de lavado del azúcar. Esto en función a las especificaciones del tipo de azúcar que se quiera producir.

## **1.2. Justificación**

En Guatemala, la industria azucarera se encarga de la producción de millones de quintales de azúcar para el consumo interno y la exportación. Uno de los objetivos de la industria es incrementar la producción a través del desarrollo y mejoramiento de la productividad, tanto en el campo como en la fábrica. Es por esto que durante todo el proceso de producción es de importancia que no existan pérdidas de la misma, y así zafra tras zafra aumentar la producción.

En el Ingenio La Unión existen pérdidas de cristales de azúcar en la estación “B de crudo” del área de centrifugación. Debido a que la estación está operando de manera incorrecta a comparación de las otras estaciones de centrifugado.

Esta problemática provoca que el Ingenio La Unión esté perdiendo dinero. Esto debido a la pérdida de cristales que disuelven dentro de la miel. Además se están teniendo pérdidas por la inversión de la sacarosa por ph bajos y por el tiempo de residencia dentro de la miel, ya que se empieza a descomponer en fructosa y glucosa.

Se busca aumentar la recuperación de cristales de azúcar por lo menos a un 82 %, para no generar pérdidas dentro del Ingenio.

### **1.3. Determinación del problema**

Se toma como base que el porcentaje de agotamiento de la estación de centrifugación “B de crudo” del Ingenio La Unión es en promedio de 55,84 % y que idealmente se espera que sea de un 82 %. Se busca aumentar la eficiencia de la estación llevando a cabo un estudio durante la zafra 2014-2015 utilizando, como medios de detección del problema, el monitoreo constante del proceso por medio del microscopio Morphologi G3 y la lámpara Estroboscópica TKRS20.

#### **1.3.1. Definición**

El aumento de la eficiencia del agotamiento dentro de la estación centrifugación “B de crudo” para disminuir las pérdidas de cristales de azúcar disueltos en la miel.

#### **1.3.2. Delimitación**

Se llevará a cabo un análisis del comportamiento de la estación de centrifugación “B de crudo” determinando las causas de la pérdida de cristales de azúcar disueltos en la miel por medio del monitoreo constante. Para posteriormente eliminar el alto porcentaje de pérdidas y así aumentar su eficiencia.

## **2. MARCO TEÓRICO**

### **2.1. Centrífugas**

Después de haber obtenido la masa cocida de los tachos, en la cual los cristales de azúcar tienen un revestimiento de miel, se deben separar los cristales del licor madre o miel y para esto se utilizan las centrífugas. En esta etapa se da la separación del azúcar y las mieles, vuelven a pasar por un proceso de recristalización, logrando así el máximo agotamiento y recuperación del azúcar contenido.

La masa cocida, el agua y el vapor que afluyen continuamente a la centrífuga, a través del dispositivo de alimentación penetran en el pote de distribución del distribuidor de producto, donde son mezclados de forma intensa y acelerados y distribuidos uniformemente. La masa cocida, preparada de esta manera, es transportada desde la campana de distribución del distribuidor al anillo opresor en la parte inferior de la canasta y desde ahí, es transportada con cuidado sobre la tela de trabajo de la canasta.

En la canasta, el licor madre o miel se separa de la masa cocida bajo la influencia de la fuerza centrífuga. El lavado de los cristales se realiza mediante la adición de agua, a través del dispositivo de lavado.

Bajo la influencia de la fuerza centrífuga, los cristales de azúcar limpios pasan por encima del borde de la canasta al espacio de azúcar. Desde allí, el azúcar continuamente en el elemento de transporte instalado debajo de la

centrífuga o se disuelve o empasta dentro de la centrífuga para ser conducido a un tratamiento ulterior a través de una tubería.

## **2.2. Centrífugas continuas**

Está realizada en construcción vertical. El accionamiento de la canasta se lleva a cabo desde abajo, por medio de un motor. Todas las piezas giratorias están envueltas de la carcasa, lo cual da lugar a una construcción cerrada. De esta manera la carcasa y el dispositivo de alimentación impiden la entrada de aire frío, favoreciendo el trabajo de separación que lleva a cabo la centrífuga, especialmente en el caso de masas cocidas de alta viscosidad.

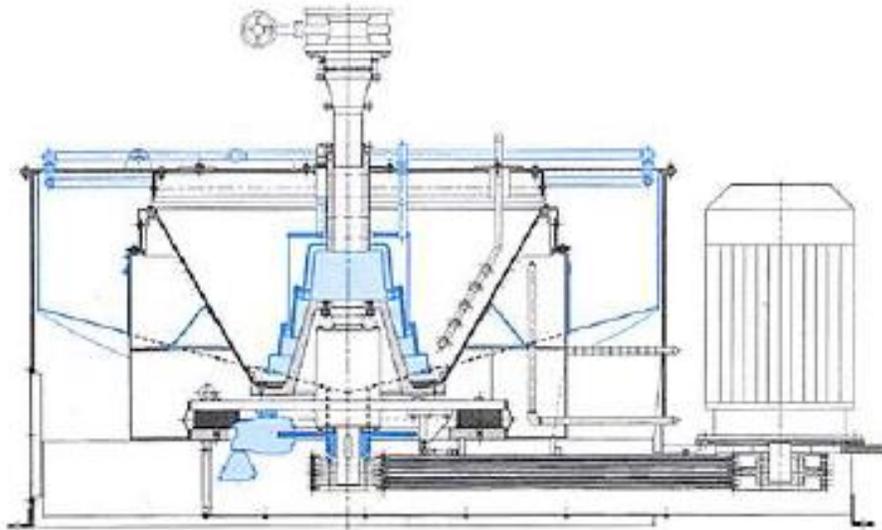
Todos los elementos de construcción que entran en contacto con la masa cocida son de acero inoxidable. Como material de la canasta es empelado un acero que cuenta con una resistencia destacada y que además es resistente a la corrosión por tensofisuración, así como particularmente resistente a iones de cloro.

Las canastas disponen de una tapa atornillada grande fácilmente desmontable, que asegura una buena accesibilidad a todo el interior de la centrífuga. Además están provistas de una pequeña tapa de montaje para el cambio fácil de los segmentos de tela. Una buena obturación entre el borde superior de la canasta y la tapa de la carcasa, así como un conducto circular que se ha trasladado más hacia el exterior, evitan que en las centrífugas de disolución y de empastado el agente de disolución penetre en el espacio de jarabe y así en las mieles.

La centrífuga continua cuenta con amortiguadores de goma especiales dispuestos, entre la brida de la caja de la pivotería y el fondo de la carcasa. Así

la posición favorable del centro de gravedad de todas las piezas giratorias referente a la pivotería y la descarga de tracción de la transmisión por correa trapezoidal facilitan una marcha estable y regular de la centrífuga. Dado que las máquinas cuentan con un alojamiento especial de la canasta y que solo las piezas giratorias son amortiguadas elásticamente, la máquina opera a un nivel de vibraciones muy bajo.

Figura 1. **Centrífuga continua**



Fuente: Programa técnico. *Centrífuga Continua BMA*. p. 5.

## **2.2.1. Partes de una centrífuga continua**

Las centrífugas se componen de diferentes partes, las cuales tienen una función específica dentro del proceso. Las partes más importantes son las siguientes:

### **2.2.1.1. Carcasa**

Es la parte exterior de la centrífuga, la cual contiene el azúcar purgado y lo dirige al conductor de azúcar por medio de dos conos bipartidos.

### **2.2.1.2. Canasta**

Las canastas están diseñadas para el turbinaje de masas cocidas de baja y de alta pureza. Estas son cónicas. Llevando a cabo varios ensayos variando el ángulo de 24° a 35°, han mostrado que un ángulo de 30° supone la posición más favorable. Son de acero inoxidable y perforadas para darle salida a la miel.

### **2.2.1.3. Tela de soporte y tela de trabajo**

La ejecución de la tela de soporte asegura un flujo sin impedimento de la miel sobre el cuerdo de la canasta así como un soporte óptimo en la tela de trabajo. Las telas son dos o tres segmentos, según el tamaño de la centrífuga y se fijan al canasto mordiéndolas por presión, van atornilladas al cabezal del movimiento y sujetadas por tres retenedores. Las telas son de acero inoxidable de 0,2 a 0,27 mm de espesor con agujeros cónicos de 0,06 mm.

#### **2.2.1.4. Dispositivo de alimentación**

Está provisto de una válvula reguladora que lleva la masa cocida al centro del soporte, sirve a su vez de cono invertido para llevar la masa al fondo y regresarla hacia arriba de la tela. La masa baja formando un corro ligeramente cónico, que es lubricado con agua por una varilla interior con pequeñas perforaciones y un sistema de lavado coaxial exterior que puede ser solamente con agua o agua y vapor.

#### **2.2.1.5. Sistema de lavado**

Se encuentra dentro de la canasta y está compuesto por dos tubos perforados paralelos a la canasta. El lavado se lleva a cabo con agua y vapor en un tiempo determinado.

#### **2.2.1.6. Compartimiento de mieles**

Este recolecta la miel que fue previamente purgada y la deposita dentro de un tanque.

#### **2.2.1.7. Soporte**

Este se encuentra conectado al motor por medio de una suspensión que cuenta con amortiguadores de hule, un eje y una polea. Además está conectado al tazón de carga y a la canasta.

### 2.2.1.8. Movimiento

Este está formado por dos poleas, una en el eje de la centrífuga y la otra en el eje del motor eléctrico y están unidas por fajas.

### 2.2.2. Datos específicos de una centrífuga continua BMA

Las centrífugas continuas BMA cuentan con datos específicos de la descripción física de cada uno de los modelos. Estos datos se describen en la siguiente tabla:

Tabla I. **Datos específicos para las centrífugas continuas BMA de los modelos K2200, K2300, K2400 y K2500**

	<i>K 2200</i>	<i>K 2300</i>	<i>K 2400</i>	<i>K 2500</i>
Diámetro superior de la canasta [mm]	1.200	1.300	1.400	1.500
Inclinación de la canasta	30°	30°	30°	30°
Superficie cribante [cm <sup>2</sup> ]	16.000	19.200	22.200	25.014
Diámetro de la carcasa [mm]	2.120	2.120	2.300	2.300
Altura de la carcasa [mm]	1.190	1.190	1.250	1.250
Factor de separación máximo (g)	2.957	2.906	2.914	2.568
Velocidad máxima [1/min]	2.100	2.000	1.930	1.750
Masa cocida de bajo grado remol. * [t/h]	15	16	17	18
Masa cocida de bajo grado caña * [t/h]	13	14	15	15
Masa cocida de azúcar bruto remol. * [t/h]	22	27	28	32
Masa cocida de azúcar bruto caña * [t/h]	20	23	24	28

Fuente: Programa técnico. *Centrífuga Continua BMA*. p. 45.

## **2.3. Microscopio Morphologi G3**

Es un instrumento basado en el análisis de imagen automatizado. Proporciona imágenes de microscopio de alta calidad e información estadística sobre el tamaño y forma de la partícula a través de un análisis rápido de cientos de miles de partículas. El Morphologi G3 es totalmente automático.

### **2.3.1. Dispersión en seco**

El control preciso a través del software de los parámetros de la dispersión asegura una alta reproducibilidad de la dispersión del polvo seco y una orientación controlada de las partículas en una amplia gama de muestras.

### **2.3.2. Emulsiones y suspensiones**

El microscopio Morphologi G3, con sus 2 ml de capacidad interior y área de escaneo, permite medir un mayor volumen de la muestra, por lo que la célula de vía líquida supera estas limitaciones de un microscopio convencional.

### **2.3.3. Diagrama de dispersión o clasificación**

Este permite una visualización de los datos de medida y puede ser utilizado para aplicar clasificaciones y filtros que permiten agrupar o excluir ciertos valores basados en parámetros de tamaño y forma.

#### **2.3.4. SOP**

El Procedimiento de Operación Estándar (SOP) elimina la tendencia inherente del usuario en los métodos de microscopía manual y además permiten el desarrollo de métodos y fácil transferencia electrónica.

#### **2.3.5. Morphologi G3 ID**

El sistema Morphologi G3 ID de caracterización de partículas combina análisis automático de imagen con identificación química de partículas individuales mediante espectroscopia. Este sistema completamente automatizado mide el tamaño de la partícula, la forma de la partícula y la identifica mediante una única plataforma.

Figura 2. **Microscopio Morphologi G3**



Fuente: Manual de uso. *Microscopio Morphologi G3*. p. 45.

## **2.4. Lámpara estroboscópica**

Permite la visualización congelada del movimiento de máquinas rotativas o recíprocas. Facilitan su inspección sin tener que detenerlas y de esta forma se puede controlar cualquier alteración, dentro del proceso en el que estén involucradas estas máquinas. La lámpara es portátil y fácil de usar.

El estroboscopio cuenta con una lámpara led de bajo consumo, la cual permite el funcionamiento de la batería recargable durante al menos doce horas. El luminoso destello del estroboscopio permite iluminar mejor la aplicación a distancia, proporcionando mayor visualización. La velocidad de destello es de hasta 300 000 destellos por minuto abarcando muchas aplicaciones de gran velocidad.

La lámpara estroboscópica cuenta con un sensor óptico remoto que permite iniciar fácilmente la lámpara de destello y que también posibilita el uso del estroboscopio como tacómetro. La pantalla lcd de fácil lectura muestra la configuración de usuario, y permite acceder rápidamente a una memoria con diez velocidades de destello programables por el usuario.

Figura 3. **Lámpara estroboscópica TKRS 20**



Fuente: Manual de uso. *Estroboscopio TKRS 20*. p. 45.

### 3. METODOLOGÍA

#### 3.1. Variables

Durante la investigación, recopilación y estudio de la información presente en libros de texto y artículos científicos, sobre los factores que influyen en las pérdidas de cristales de azúcar dentro de la centrifugación, ha sido necesario contar con las siguientes variables para evaluar el tema planteado.

Tabla II. **Definición operacional y descripción de las variables independientes**

Núm.	Variable	Unidad	Constante	Variable
1	Carga (C)	A		X
2	Flujo de agua (A)	L/h		X
1	Porcentaje de distribución de agua (P)	%		X
3	Presión de vapor (V)	-		X

Fuente: elaboración propia.

Tabla III. **Definición de variables respuesta**

Núm.	Variable	Unidad
1	Cantidad de grano en miel	$\mu m$

Fuente: elaboración propia.

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

La investigación se llevó a cabo a partir de una delimitación del campo de estudio, el cual se explica a continuación.

#### **3.2.1. Campo de estudio**

El estudio se llevará a cabo en el Ingenio La Unión, en la producción de azúcar. Los campos de estudio involucrados son las operaciones unitarias de balance de masa, transferencia de calor y de masa y fisicoquímica.

#### **3.2.2. Etapas que conforman la investigación**

- Análisis del proceso de centrifugación dentro del área de fabricación del Ingenio.
- Recolección de datos necesarios para llevar a cabo la investigación.
- Evaluación de las características del proceso encontradas a través de la recolección de datos.

#### **3.2.3. Ubicación del desarrollo de la investigación**

Ingenio La Unión, Finca Belén, km 101,5 carretera a Cerro Colorado, Santa Lucía Cotzumalguapa, Escuintla.

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

Los recursos humanos con los que se cuentan para la investigación son los siguientes:

### **3.3.1. Investigador**

Dicho proyecto lo realizará la estudiante Lisbeth Mariela Samayoa Bernal inscrita en la carrera de Química de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

### **3.3.2. Asesor**

La investigación estará asesorada por la Inga. Vivianne Patricia Ruíz Valenzuela.

### **3.3.3. Coasesor**

Para la investigación será coasesorada por el Ing. Ramiro Rafael Cifuentes de León.

## **3.4. Recursos materiales disponibles**

Los recursos materiales con los que se cuentan para la investigación son los siguientes:

### **3.4.1. Equipo**

Dentro del equipo que se utilizará para la investigación se tomará en cuenta la materia prima y los equipos de medición.

### **3.4.2. Materia prima**

La principal materia prima que se necesitará para la investigación es:

- Masa cocida de la línea de azúcar crudo.

### **3.4.3. Equipo de medición**

El equipo de medición que utilizará esta investigación es:

- Centrífugas continuas BMA K-2300
- Microscopio Morphologi G3
- Lámpara estroboscópica
- Refractómetro
- Polarímetro

### **3.5. Técnica cuantitativa**

A continuación se establece la metodología a seguir, para llevar a cabo la investigación de la causa de la presencia de granos de azúcar en la miel de la estación “B de crudo”. Esta contiene el procedimiento general, las variables involucradas, el método conveniente a utilizar, el procedimiento experimental y las técnicas de análisis.

- Procedimiento

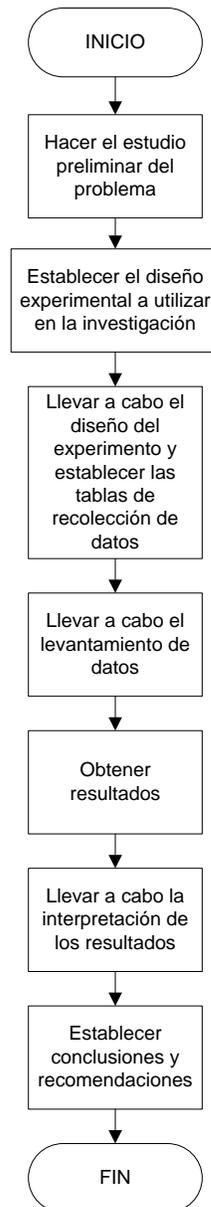
El procedimiento que se describirá a continuación incluye las características del experimento, junto con el análisis estadístico utilizado.

### **3.5.1. Evaluación del comportamiento de la estación de centrífugas “B de crudo”**

Se llevó a cabo la evaluación del comportamiento de la estación completa y de cada una de las centrífugas por aparte, en función de la presencia de granos de azúcar en la miel de cada una de ellas. Además se analizó el comportamiento de las mismas realizando variaciones en el tipo y frecuencia de las limpiezas y en la estructura de la tubería de salida de la miel de las máquinas, para ampliar el panorama de las variables principales a tomar en cuenta.

Se utilizaron 30 días previos a llevar a cabo la experimentación, como periodo de premuestreo. Esto sirvió para conocer el estado de la estación y de cada una de las máquinas y así obtener una referencia para elegir el método que se adapte de una mejor manera a su comportamiento. Las muestras de las mieles fueron tomadas en los lugares habituales y bajo las condiciones de operación normales.

Figura 4. Diagrama de flujo general del procedimiento



Fuente: elaboración propia, utilizando el programa Visio.

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

La recolección y ordenamiento de la información se llevará a cabo a partir del siguiente orden:

#### **3.6.1. Análisis del proceso de centrifugación**

Centrifugación es el proceso que por medio de la fuerza centrífuga lleva a cabo la separación de los cristales de azúcar de la miel o licor madre.

#### **3.6.2. Recolección de los datos experimentales**

Se llevará a cabo un levantamiento de datos experimentales. Por esto se podrán obtener los resultados del proceso de centrifugación de la estación “B de crudo” del Ingenio La Unión y así dar una solución para aumentar la eficiencia de la misma.

#### **3.6.3. Evaluación de las características del proceso**

Llevar a cabo la evaluación de las características del proceso encontradas a través de la recolección de datos, para que sea más fácil dar una solución para aumentar la eficiencia de la estación “B de crudo” del Ingenio La Unión.

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

Se llevaron a cabo gráficos de control para evaluar la estabilidad del proceso de la línea "B de crudo". Además se realizó la elección del método a utilizar, el cual es el diseño robusto ortogonal de Taguchi  $L_9$ . Este encaminará la investigación hacia un análisis estadístico en el que se tomó en cuenta la varianza, desviación estándar y el análisis de varianza (ANOVA) para la comparación de medias.

El objetivo primordial de un diseño robusto es identificar el conjunto de parámetros o factores que proporcionan al producto o al proceso la capacidad de ser insensibles o invariantes frente a cambios en las condiciones de operación medio-ambientales. El diseño robusto ortogonal de Taguchi  $L_9$  toma en cuenta el análisis de cuatro factores diferentes con tres niveles de incidencia cada uno, el cual propone un total de nueve arreglos experimentales. Cada experimento se deberá controlar durante tres horas, obteniendo una muestra de las mieles cada hora. Si los resultados en esas tres muestras tomadas son altamente variados se tomarán dos muestras más, para hacer un total de cinco muestras.

Si se observa que la experimentación no está dando los resultados esperados se tomará en cuenta el mismo diseño robusto ortogonal de Taguchi  $L_9$ , pero únicamente con tres variables. Esto dará lugar a una segunda opción de la metodología experimental.

- Procedimiento experimental

Se presentan dos opciones, cada una con los factores y niveles, de acuerdo a la matriz de experimentos.

### 3.7.1. Primera opción

Los factores y niveles elegidos para la investigación fueron seleccionados según la influencia dentro del proceso.

Tabla IV. **Factores y sus niveles**

Factor	Niveles		
	1	2	3
Carga (A°)	85	90	95
Flujo Agua (L/h)	200	250	300
Distribución de agua (L/h)	10 % P / 90 % C	25 % P / 75 % C	40 % P / 60 % C
Flujo de vapor (apertura de válvula)	1/2	3/4	1

Fuente: elaboración propia.

Tabla V. **Matriz de experimentos**

Núm.	Columna de números de factores asignados			
	Carga	Flujo de agua	Distribución de agua	Presión de vapor
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

Fuente: Phadke, M. *Quality engineering using robust design*. p. 45.

Tabla VI. **Sustitución de valores en matriz de experimentos**

Núm.	Columna de números de factores asignados			
	Carga	Flujo de agua	Distribución de agua	Presión de vapor
1	85	200	10 % P / 90 % C	1/2
2	85	250	25 % P / 75 % C	3/4
3	85	300	40 % P / 60 % C	1
4	90	200	25 % P / 75 % C	1
5	90	250	40 % P / 60 % C	1/2
6	90	300	10 % P / 90 % C	3/4
7	95	200	40 % P / 60 % C	3/4
8	95	250	10 % P / 90 % C	1
9	95	300	25 % P / 75 % C	1/2

Fuente: elaboración propia.

### 3.7.2. Segunda opción

Se planteó una segunda opción para llevar a cabo la investigación eliminando un factor, para facilitar la metodología.

Tabla VII. Factores y sus niveles

Factor	Niveles		
	1	2	3
Carga (A°)	85	90	95
Flujo Agua (L/h)	200	250	300
Flujo de vapor (apertura de válvula)	1/2	3/4	1

Fuente: elaboración propia.

Tabla VIII. Matriz de experimentos

Núm.	Columna de números de factores asignados		
	Carga	Flujo de agua	Distribución de agua
1	1	1	1
2	1	2	2
3	1	3	3
4	2	2	3
5	2	3	1
6	2	1	2
7	3	3	2
8	3	1	3
9	3	2	1

Fuente: Phadke, M. *Quality engineering using robust design*. p. 45.

Tabla IX. **Sustitución de valores en matriz de experimentos**

Núm.	Columna de números de factores asignados		
	Carga	Flujo de agua	Distribución de agua
1	85	200	1/2
2	85	250	3/4
3	85	300	1
4	90	250	1
5	90	300	1/2
6	90	200	3/4
7	95	300	3/4
8	95	200	1
9	95	250	1/2

Fuente: elaboración propia.

### 3.7.3. Medidas de dispersión

Describen la cantidad de dispersión, o variabilidad que se encuentra entre los datos. El agrupamiento entre los datos indica una dispersión baja y viceversa.

#### 3.7.3.1. Varianza

Es la media de las desviaciones (x) al cuadrado respecto a la media aritmética ( $x_p$ ) de una distribución estadística.

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

Ec. 2

Donde, n es el tamaño de la muestra.

### 3.7.3.2. Desviación estándar

Es la raíz cuadrada positiva de la varianza. Es decir, la raíz cuadrada de la media de los cuadrados de las puntuaciones de desviación.

$$S = \sqrt{S^2}$$

Ec. 3

### 3.7.3.3. Análisis de varianza (ANOVA)

Para la evaluación estadística de los datos a obtener en la experimentación, a realizar en la estación de centrifugas “B de crudo”, se llevará a cabo un análisis de varianza, basado en un software estadístico llamado “Spss Statistics”. A través del mismo se podrán obtener los valores de la suma de cuadrados, grados de libertad, cuadrados medios y F calculada, tomando en cuenta las siguientes ecuaciones:

Tabla X. Ecuaciones sumas de cuadrados

Suma de cuadrados	Ecuación
Suma total de cuadrados (SST)	$SST = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_i)^2$
Suma de cuadrados de tratamiento (SSA)	$SSA = \sum_{i=1}^n n_i (\bar{y}_i - \bar{y})^2$
Suma de cuadrados del error (SSE)	$SSE = SST - SSA$

Fuente: Phadke, M. *Quality engineering using robust design*. p. 45.

Donde:

$y_{ij}$  = total de las observaciones bajo el i,j-ésimo tratamiento

$\bar{y}_i$  = promedio total de las observaciones bajo el i,j-ésimo tratamiento

#### **3.7.4. Programas para el análisis de datos**

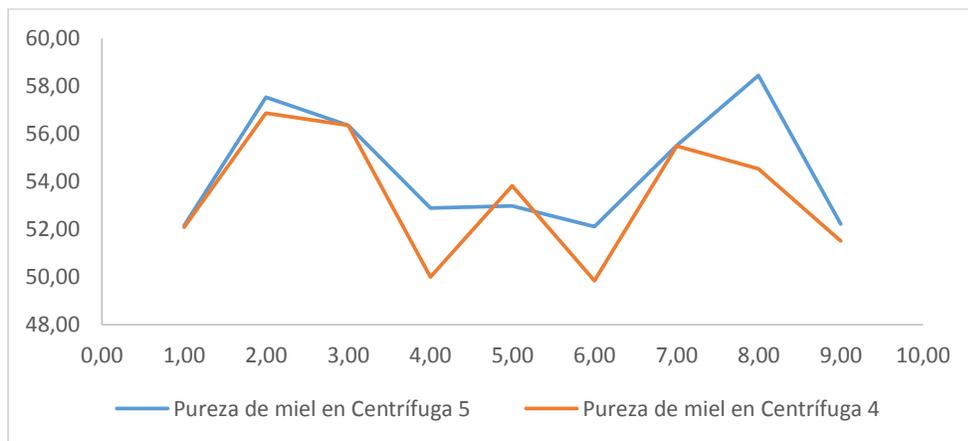
Se utilizará el sistema operativo Windows 7 Professional así como los siguientes programas:

- Microsoft Word: creará y editará documentos profesionales
- Microsoft Excel: procesará, graficará y analizará información
- Microsoft Visio: creará, editará y compartirá diagramas
- Microsoft PowerPoint: elaborará y editará presentaciones
- SPSS STATISTICS: realizará el análisis estadístico

## 4. RESULTADOS

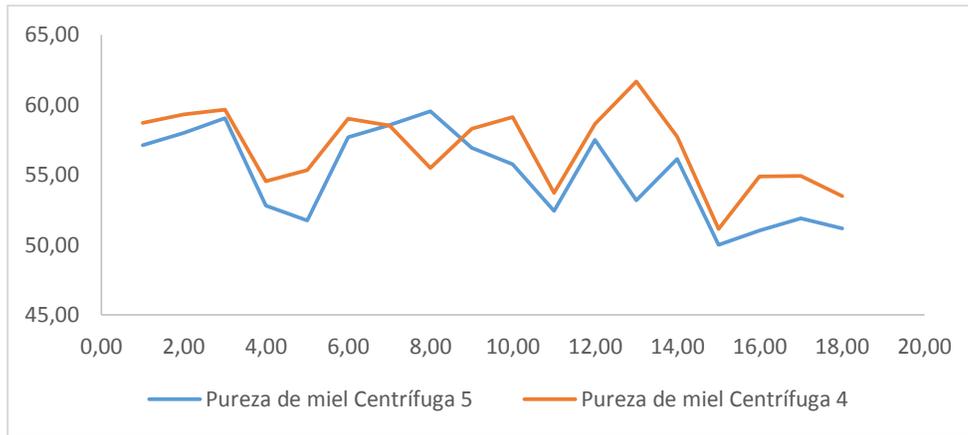
A continuación se presentan los resultados obtenidos para la investigación llevada a cabo en las centrifugas de la estación “B de crudo”.

Figura 5. **Pureza de la miel en centrifugas 4 y 5, sin variar el proceso**



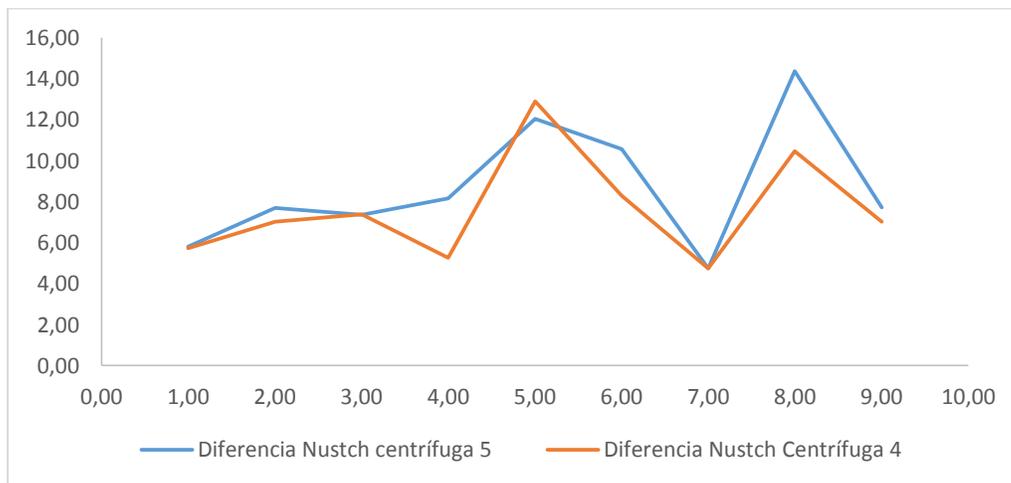
Fuente: elaboración propia.

Figura 6. **Pureza de la miel en centrífugas 4 y 5, variando el proceso**



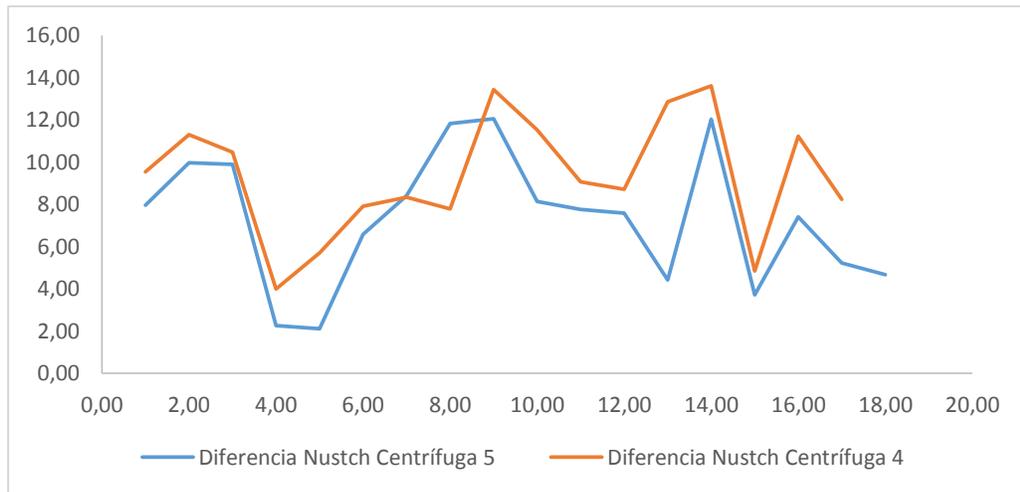
Fuente: elaboración propia.

Figura 7. **Diferencia de pureza miel Nustch-Centrífuga 4 y 5, sin variar el proceso**



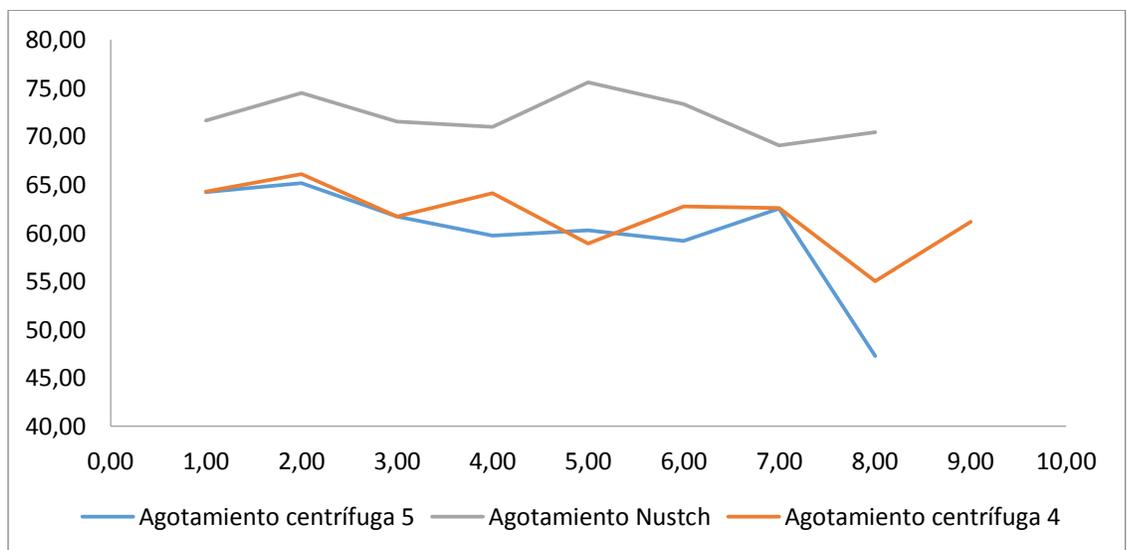
Fuente: elaboración propia.

Figura 8. **Diferencia de pureza miel Nustch-Centrífuga 4 y 5, variando el proceso**



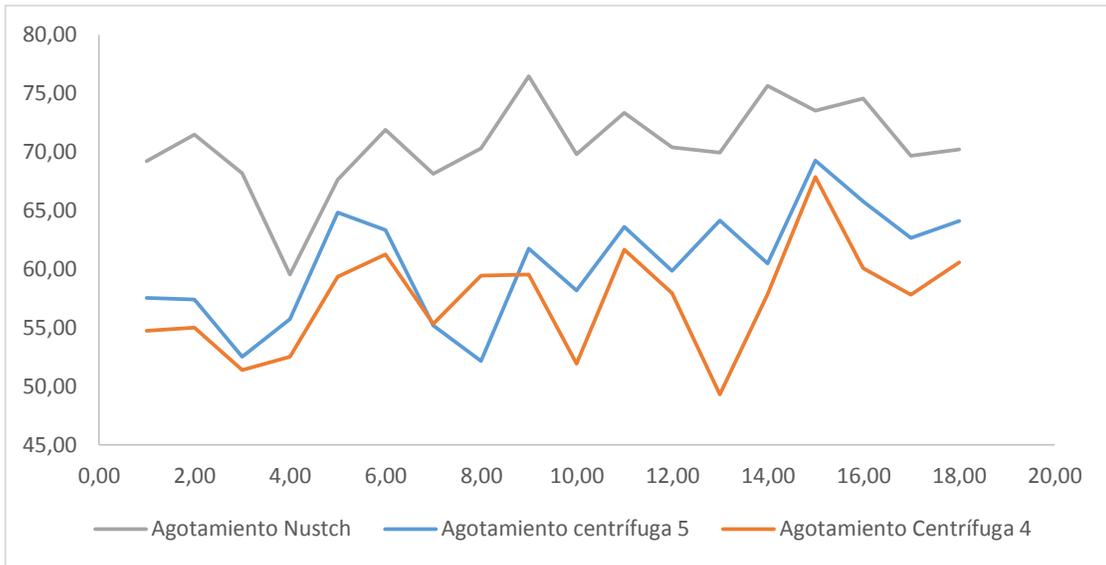
Fuente: elaboración propia.

Figura 9. **Agotamiento, sin variaciones al proceso**



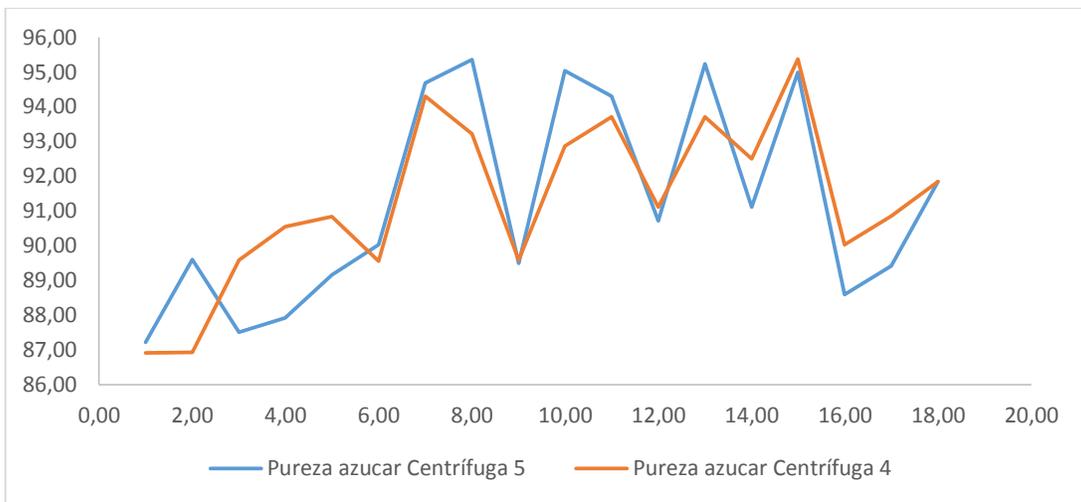
Fuente: elaboración propia.

Figura 10. **Agotamiento, con variaciones al proceso**



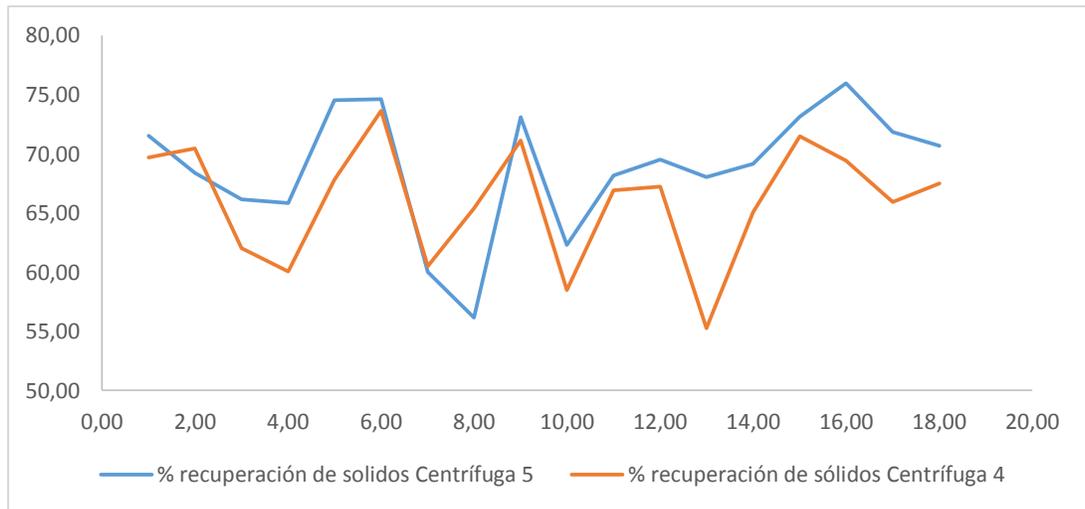
Fuente: elaboración propia.

Figura 11. **Pureza del azúcar en centrífugas 4 y 5, variando el proceso**



Fuente: elaboración propia.

Figura 12. **Porcentaje de recuperación de sólidos en Centrífugas 4 y 5, variando el proceso**



Fuente: elaboración propia.

Tabla XI. **Selección de la corrida con mejores resultados**

Núm. Corrida	Recuperación de sólidos 5	Recuperación de sólidos 4	Promedio x Corrida 5	Promedio x Corrida 4	Diferencia Promedio Corridas
1	71,53	69,66	69,96	70,05	-0,09
	68,38	70,44			
2	66,16	62,04	66,00	61,04	4,96
	65,85	60,04			
3	74,53	67,81	74,56	70,72	3,84
	74,58	73,62			
4	59,98	60,49	58,08	62,94	-4,86
	56,17	65,38			
5	73,09	71,10	67,68	64,78	2,90
	62,28	58,46			
6	68,17	66,90	68,83	67,06	1,76
	69,48	67,23			
7	68,00	55,25	68,57	60,16	8,41
	69,13	65,06			
8	73,14	71,49	74,55	70,45	4,10
	75,97	69,42			
9	71,83	65,91	71,24	66,69	4,55
	70,66	67,47			

Fuente: elaboración propia.

Tabla XII. **Punto óptimo de cada factor en la mejor corrida**

Factor	Niveles		
	1	2	3
Carga (A°)	85	90	95
Flujo de agua (L/h)	200	250	300
Flujo de vapor (Abertura válvula)	1/2	3/4	1

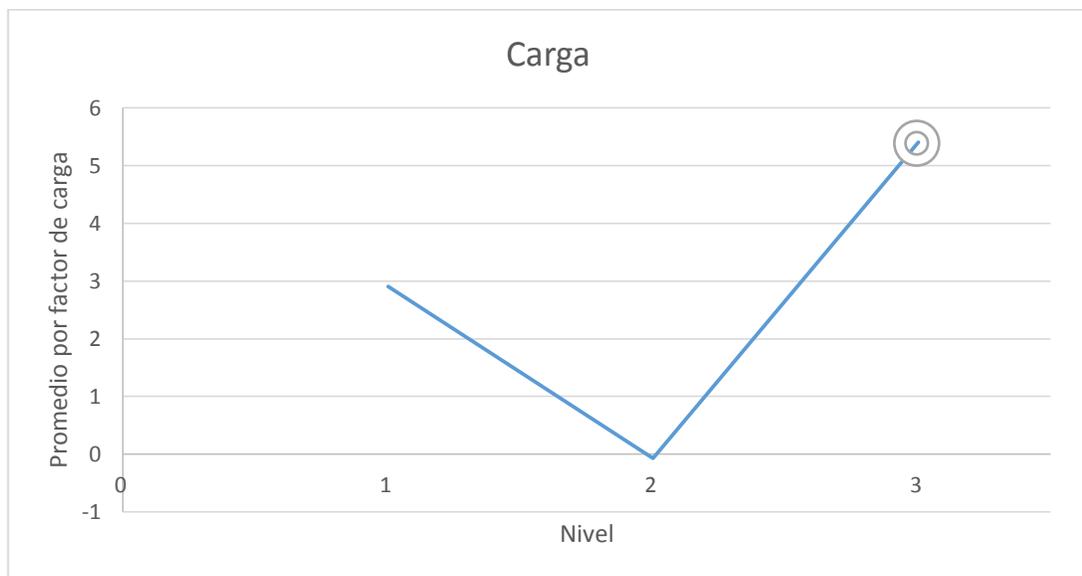
Fuente: elaboración propia.

Tabla XIII. **Promedios por factor**

Niveles	Promedio por factor de carga	Promedio por factor de flujo de agua	Promedio por factor de flujo de vapor
1	2,90	1,92	2,45
2	-0,07	1,55	5,04
3	5,69	5,05	1,03

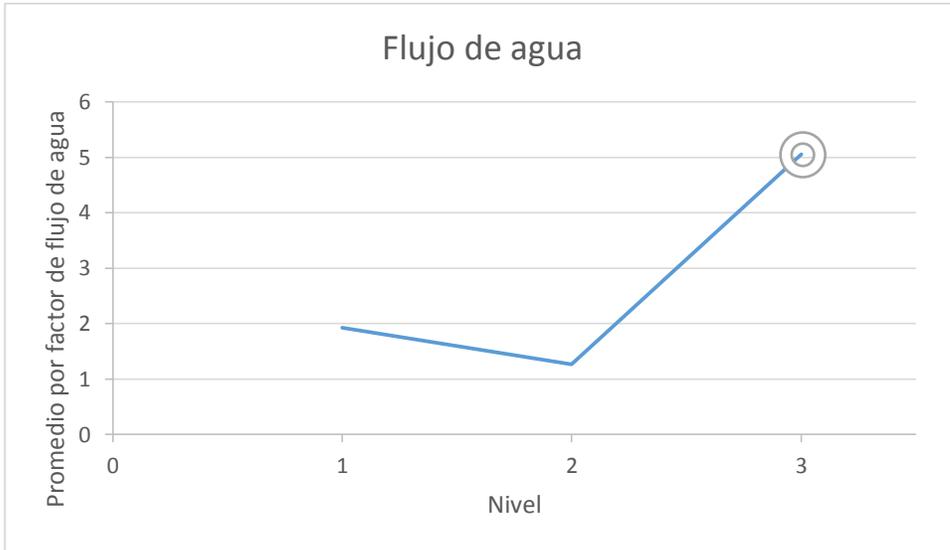
Fuente: elaboración propia.

Figura 13. **Promedio de factor de carga por nivel**



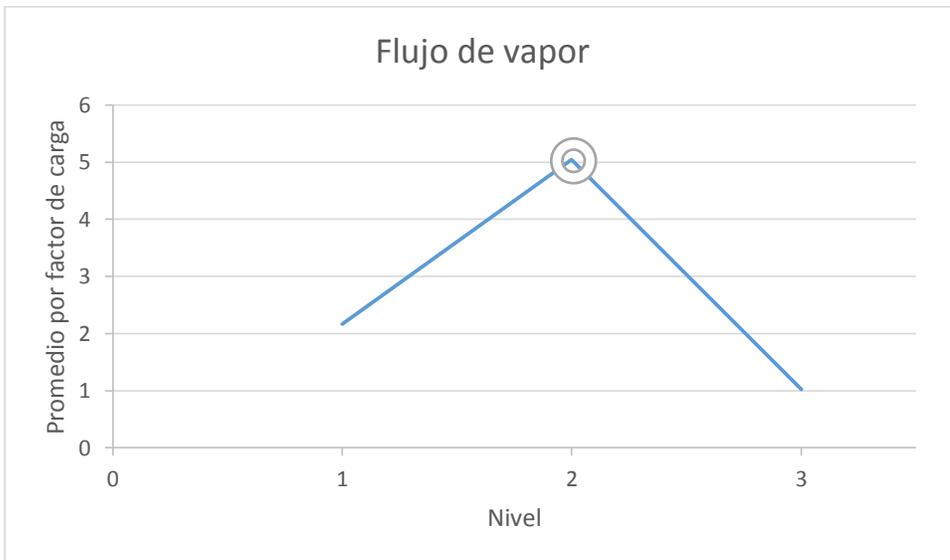
Fuente: elaboración propia.

Figura 14. Promedio por factor de flujo de agua por nivel



Fuente: elaboración propia.

Figura 15. Promedio por factor de carga por nivel



Fuente: elaboración propia.

Tabla XIV. **Análisis de varianza**

**Tests of Between-Subjects Effects**

Dependent Variable: Grano

Source	Type I Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Model	338.650 <sup>a</sup>	7	48.379	3.649	.028
Carga	244.575	3	81.525	6.149	.010
Agua	44.305	2	22.153	1.671	.232
Vapor	49.770	2	24.885	1.877	.199
Error	145.838	11	13.258		
Total	484.488	18			

a. R Squared = .699 (Adjusted R Squared = .507)

Fuente: elaboración propia, con programa *SPSS Statistics*.



## 5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

El objetivo de la investigación fue mejorar la eficiencia de las centrífugas de la estación “B de crudo”, a través del monitoreo constante del proceso, para disminuir los costos de operación y plantear alternativas de solución. Para ello se llevó a cabo un diseño experimental que permitiera reducir el número de pruebas y mezclara todas las variables presentes en la experimentación. Antes de iniciar con las variaciones en la centrífuga 5 se hicieron nueve corridas para ver el estado de la máquina y así tener un parámetro de comparación al iniciar con las variaciones en el proceso.

En la figura 5 de la sección de resultados se observa el agotamiento que se obtuvo antes de iniciar con los cambios. En la figura se refleja que el comportamiento del agotamiento para las centrífugas 4 y 5 es similar. En la figura 6 de la sección de resultados se ve el comportamiento del agotamiento al realizar las variaciones, y se nota que el agotamiento es mayor en la centrífuga 5 a comparación de la centrífuga 4.

La diferencia entre miel Nustch-Centrífuga, sin llevar a cabo ninguna variación al proceso, se muestra en la figura 7 de la sección de resultados y se verifica que su comportamiento de esta diferencia entre la centrífuga 4 y 5 es similar. La diferencia entre miel Nutch-Centrífuga, llevando a cabo variaciones en el proceso, se muestra en la figura 8 de la sección de resultados, en la cual es evidente que la diferencia es menor en la centrífuga 5.

En la figura 9 de la sección de resultados se observa la comparación de la pureza de la miel entre la centrífuga 4 y 5 si hacer cambios en el proceso; para esto se ve que la tendencia de la pureza de la miel de la centrífuga 5 es mayor que la tendencia de la pureza de la miel de la centrífuga 4. En la figura 10 de la sección de resultados se verifica la comparación de la tendencia de la pureza de la miel entre las centrífugas 5 y 4 llevando a cabo variaciones en el proceso y es evidente que esta es menor que la tendencia de la pureza de la miel de la centrífuga 4.

La tendencia de la pureza del azúcar en la centrífugas 4 y 5, llevando a cabo variaciones en el proceso, se representa en la figura 11 de la sección de resultados. Se puede observar que la tendencia de la pureza del azúcar en la centrífuga 5 es mayor, comparada con la pureza del azúcar de la centrífuga 4.

Por último, en la figura 12 de la sección de resultados se muestra la tendencia de la recuperación de sólidos de las centrífugas 4 y 5 llevando a cabo variaciones en el proceso. Para ello se determina que la recuperación de sólidos en la centrífuga 5 es mayor que en la centrífuga 4. Por lo que se concluye que las variaciones que se tomaron en cuenta para el proceso fueron favorables.

## CONCLUSIONES

1. El punto óptimo de operación de las centrífugas de la estación B de crudo es de 95 A de carga, 300 L/h de agua y una abertura de la válvula de vapor de  $\frac{3}{4}$  de una vuelta, introduciendo el vapor en las toberas de la parte inferior de la canasta.
2. La variable que estadísticamente es más influyente sobre el proceso es la carga.
3. Al operar las centrífugas de la estación B de crudo en su punto óptimo:
  - Aumenta el agotamiento de las masas
  - La diferencia Nustch-Centrífuga disminuye
  - La pureza de la miel disminuye
  - La pureza del azúcar aumenta
  - El porcentaje de recuperación de sólidos aumenta



## RECOMENDACIONES

1. Verificar que las masas que van directo a las centrífugas tengan la consistencia de viscosidad y Brix adecuadas.
2. Monitorear la granulometría del proceso de B de crudo constantemente para identificar problemas con el crecimiento y fortalecimiento de los cristales de azúcar.
3. Verificar que los operadores de la estación B de crudo lleven a cabo su trabajo según las obligaciones asignadas.



## BIBLIOGRAFÍA

1. BMA, Necersa. *Programa Técnico Centrífugas Continuas*. Alemania: BMA, 2007. 250 p.
2. CHEN, James. *Manual del azúcar de caña*. México: Noriega Editores, 1985. 597 p.
3. CUTZ SAQUIMUX, Luis Leonardo. *Determinación de la pérdida de azúcar por exceso de lavado en una centrífuga semiautomática 1.22m x 0.78m Ingenio Trinidad, Escuintla, Guatemala*. Guatemala, 2004. 83 p.
4. MALVERN Instruments. *Manual de uso, Morphologi G3*. Reino Unido, Inglaterra: Malvern, 2008. 218 p.
5. PHADKE, Madhav S. *Quality engineering using robust design*. Estados Unidos: AT&T Bell Laboratories, 1989. 467 p.
6. REIN, Peter. *Ingeniería de la caña de azúcar*. Alemania: Bartens, 2012. 768 p.
7. SKF Microlog. *Estroboscopios SKF serie TKRS*. Estados Unidos: SKF, 2011. 15 p.



## APÉNDICES

### Apéndice 1. Muestra de cálculo

- **Pureza de una muestra**

$$Pza = \frac{Pol}{Bx} * 100$$

Ec. 4

Ref. 5

Donde:

$Pza$ = pureza

$Pol$ = polarización

$Bx$ = brix

- **Porcentaje de agotamiento de la masa**

$$A_{Ma} = 100 * \frac{100 * (P_{Ma} - P_{Mol})}{P_{Ma} * (100 - P_{Mol})}$$

Ec. 5

Ref. 5

Donde:

$A_{Ma}$ = agotamiento de la masa (%)

$P_{Ma}$ = pureza de la masa

$P_{Mol}$ = pureza de la miel

- **Porcentaje de recuperación de azúcar**

$$R_s = \frac{P_s * (P_{Ma} - P_{Mol})}{P_{Ma} * (P_s - P_{Mol})} * 100$$

Ec. 6

Ref. 5

Donde:

$R_s$ = porcentaje de recuperación de azúcar (%)

$P_s$ = pureza del azúcar

$P_{Ma}$ = pureza de la masa

$P_{Mol}$ = pureza de la miel

- Datos calculados

## Apéndice 2. Purezas de la masa, miel y azúcar para las centrifugas 4 y 5

Núm.	Datos masa directa			Datos miel directa 5			Datos miel directa 4			Datos azúcar 5			Datos azúcar 4		
	Brix	Pol	Pza	Brix	Pol	Pza	Brix	Pol	Pza	Brix	Pol	Pza	Brix	Pol	Pza
1	93,40	70,84	75,85	88,40	50,50	57,13	88,40	51,88	58,69	97,80	85,30	87,22	97,80	85,00	86,91
	94,20	71,98	76,41	89,60	51,94	57,97	87,20	51,72	59,31	97,60	87,44	89,59	96,40	83,80	86,93
2	93,20	70,12	75,24	88,00	51,96	59,05	87,20	52,00	59,63	95,60	83,66	87,51	99,00	88,68	89,58
	92,40	66,20	71,65	88,40	46,68	52,81	95,20	51,92	54,54	97,80	85,98	87,91	99,00	89,64	90,55
3	93,80	70,62	75,29	87,40	45,22	51,74	87,40	48,36	55,33	99,20	88,44	89,15	98,00	89,02	90,84
	93,80	73,90	78,78	87,40	50,40	57,67	87,40	51,56	58,99	98,40	88,58	90,02	97,60	87,40	89,55
4	93,60	71,08	75,94	89,40	52,36	58,57	88,00	51,48	58,50	101,00	95,62	94,67	100,40	94,68	94,30
	94,60	71,38	75,45	85,60	50,96	59,53	88,20	48,94	55,49	101,20	96,50	95,36	100,20	93,40	93,21
5	94,80	73,52	77,55	87,80	49,98	56,92	88,20	51,42	58,30	98,80	88,42	89,49	98,80	88,50	89,57
	94,20	70,72	75,07	87,00	48,50	55,75	87,80	51,92	59,13	100,60	95,60	95,03	99,40	92,30	92,86
6	96,40	72,48	75,19	84,60	44,36	52,43	87,40	46,96	53,73	100,20	94,48	94,29	97,20	91,08	93,70
	95,00	73,26	77,12	85,40	49,10	57,49	86,40	50,66	58,63	98,40	89,26	90,71	98,80	90,02	91,11
7	92,80	70,54	76,01	85,60	45,54	53,20	89,00	54,86	61,64	100,60	95,80	95,23	99,80	93,52	93,71
	94,20	71,98	76,41	86,00	48,28	56,14	84,40	48,72	57,73	98,00	89,28	91,10	98,00	90,64	92,49
8	94,00	71,92	76,51	86,60	43,32	50,02	84,80	43,38	51,16	100,00	94,98	94,98	100,00	95,36	95,36
	94,80	71,36	75,27	87,20	44,50	51,03	85,40	46,86	54,87	97,80	86,64	88,59	98,20	88,40	90,02
9	94,00	69,82	74,28	88,00	45,66	51,89	85,60	47,00	54,91	98,60	88,16	89,41	98,80	89,76	90,85
	94,00	70,00	74,47	86,00	44,00	51,16	86,00	46,00	53,49	98,00	90,00	91,84	98,00	90,00	91,84

Fuente: ecuación 4, Muestra de Cálculo, Apéndices.

**Apéndice 3. Porcentaje de agotamiento de la masa B de crudo**

Núm.	Masa	Miel 5	Miel 4	Az 5	Az 4	Agotamiento centrífuga 5	Agotamiento centrífuga 4
	Pza	Pza	Pza	Pza	Pza		
1	75,85	57,13	58,69	87,22	86,91	57,57	54,76
	76,41	57,97	59,31	89,59	86,93	57,43	55,00
2	75,24	59,05	59,63	87,51	89,58	52,55	51,38
	71,65	52,81	54,54	87,91	90,55	55,72	52,52
3	75,29	51,74	55,33	89,15	90,84	64,81	59,34
	78,78	57,67	58,99	90,02	89,55	63,32	61,26
4	75,94	58,57	58,50	94,67	94,30	55,21	55,34
	75,45	59,53	55,49	95,36	93,21	52,14	59,45
5	77,55	56,92	58,30	89,49	89,57	61,75	59,53
	75,07	55,75	59,13	95,03	92,86	58,17	51,96
6	75,19	52,43	53,73	94,29	93,70	63,62	61,68
	77,12	57,49	58,63	90,71	91,11	59,86	57,94
7	76,01	53,20	61,64	95,23	93,71	64,13	49,29
	76,41	56,14	57,73	91,10	92,49	60,49	57,85
8	76,51	50,02	51,16	94,98	95,36	69,27	67,85
	75,27	51,03	54,87	88,59	90,02	65,77	60,06
9	74,28	51,89	54,91	89,41	90,85	62,65	57,83
	74,47	51,16	53,49	91,84	91,84	64,08	60,57

Fuente: ecuación 5, Muestra de Cálculo, Apéndices.

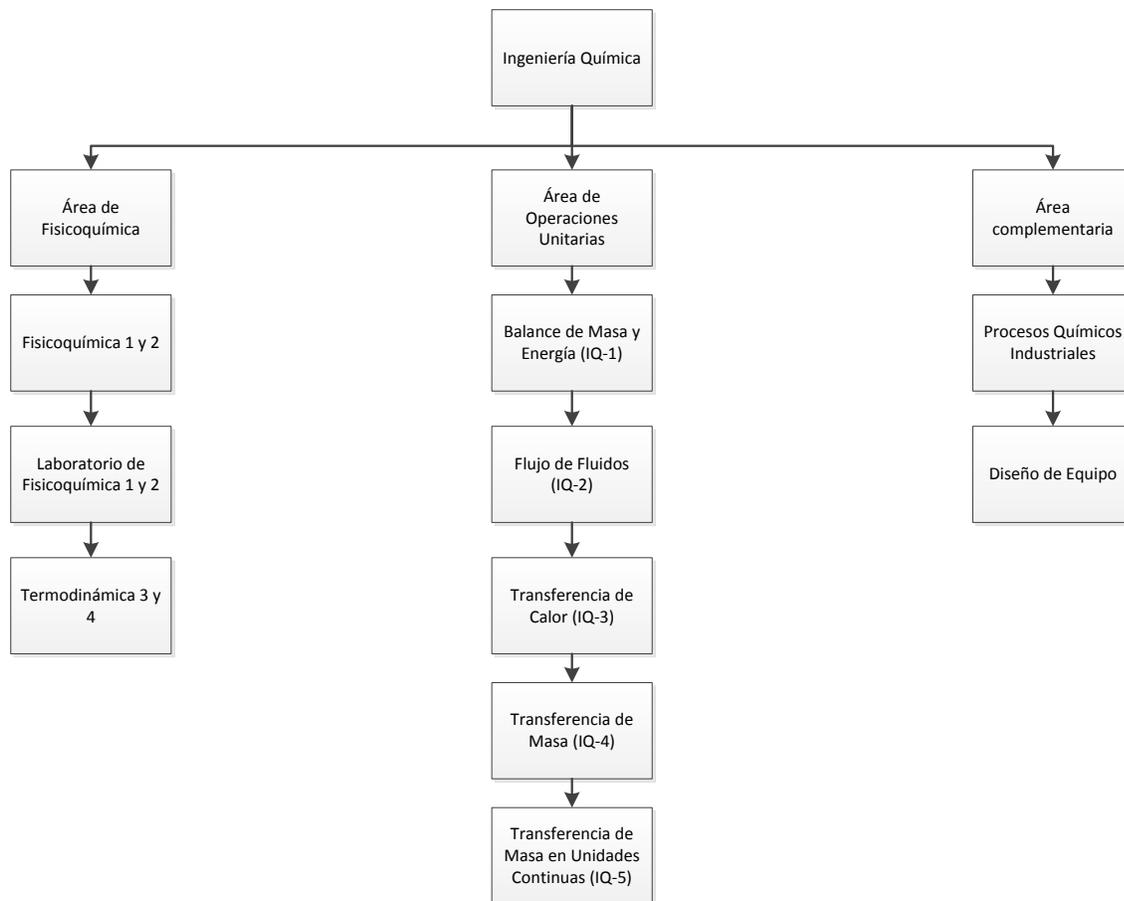
**Apéndice 4. Porcentaje de recuperación de azúcar**

Núm.	Masa Pza	Miel 5 Pza	Miel 4 Pza	Az 5 Pza	Az 4 Pza	Recuperación de sólidos 5	Recuperación de sólidos 4
1	75,85	57,13	58,69	87,22	86,91	71,53	69,66
	76,41	57,97	59,31	89,59	86,93	68,38	70,44
2	75,24	59,05	59,63	87,51	89,58	66,16	62,04
	71,65	52,81	54,54	87,91	90,55	65,85	60,04
3	75,29	51,74	55,33	89,15	90,84	74,53	67,81
	78,78	57,67	58,99	90,02	89,55	74,58	73,62
4	75,94	58,57	58,50	94,67	94,30	59,98	60,49
	75,45	59,53	55,49	95,36	93,21	56,17	65,38
5	77,55	56,92	58,30	89,49	89,57	73,09	71,10
	75,07	55,75	59,13	95,03	92,86	62,28	58,46
6	75,19	52,43	53,73	94,29	93,70	68,17	66,90
	77,12	57,49	58,63	90,71	91,11	69,48	67,23
7	76,01	53,20	61,64	95,23	93,71	68,00	55,25
	76,41	56,14	57,73	91,10	92,49	69,13	65,06
8	76,51	50,02	51,16	94,98	95,36	73,14	71,49
	75,27	51,03	54,87	88,59	90,02	75,97	69,42
9	74,28	51,89	54,91	89,41	90,85	71,83	65,91
	74,47	51,16	53,49	91,84	91,84	70,66	67,47

Fuente: ecuación 6, Muestra de Cálculo, Apéndices.

- Diagrama de requisitos académicos

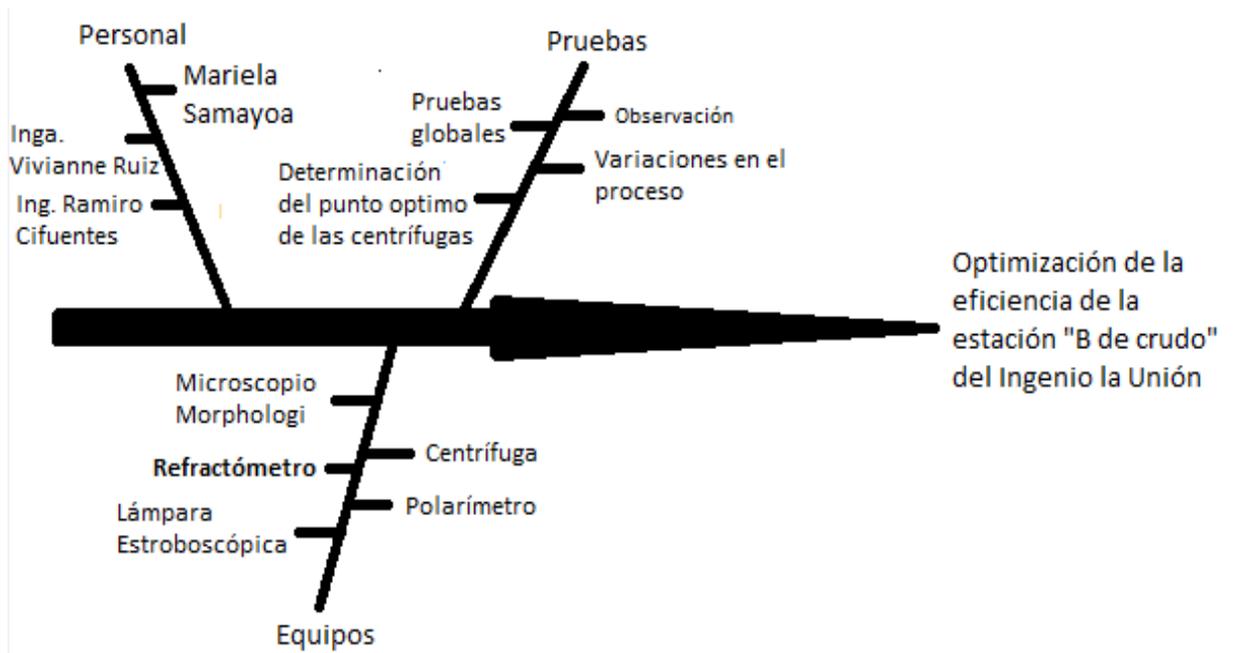
## Apéndice 5. Requisitos académicos



Fuente: elaboración propia.

- Diagrama de Ishikawa

Apéndice 6. **Ishikawa**

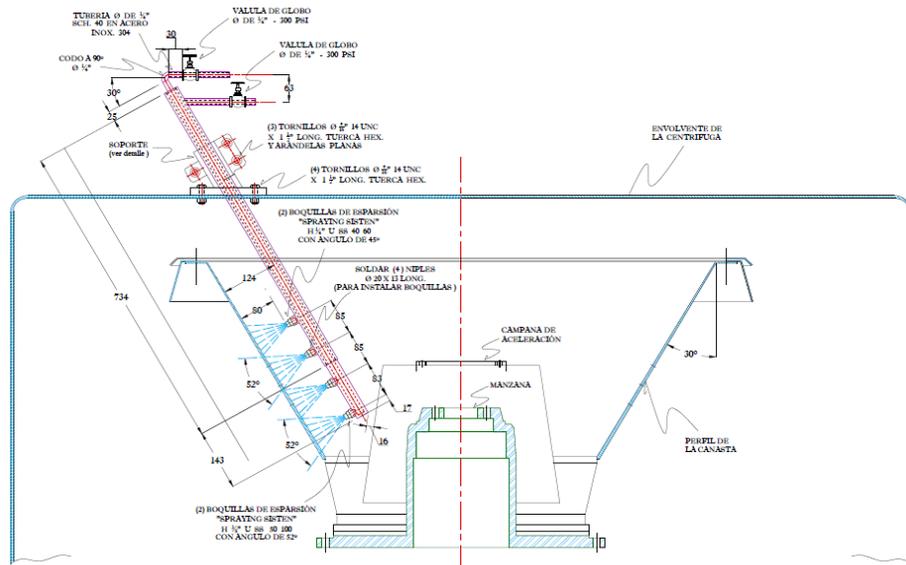


Fuente: elaboración propia, por medio del programa Paint.



# ANEXOS

## Anexo 1. Diseño de la tubería de vapor en las centrífugas B de crudo

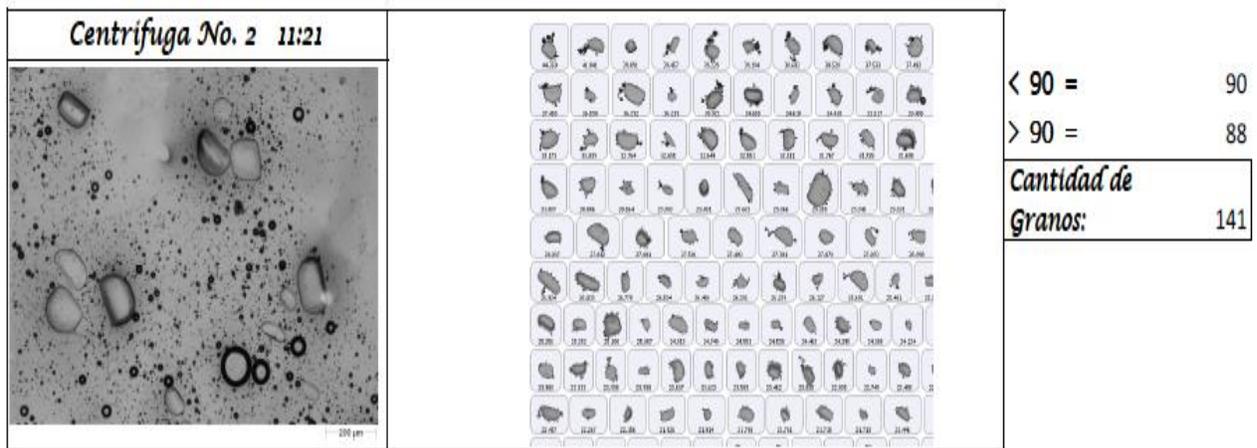


Fuente: referencia 5.

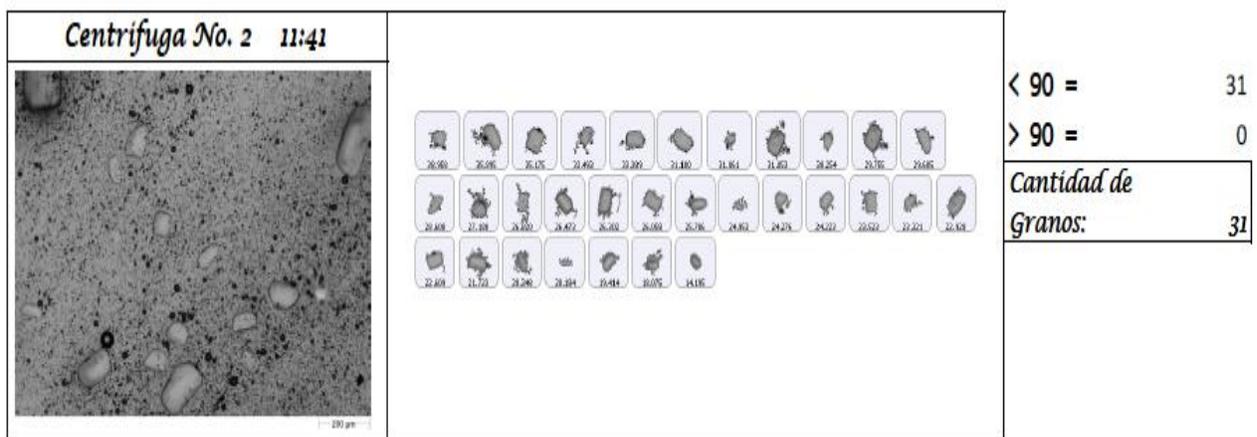
Anexo 2. **Reporte de grano en miel de centrifuga 2, estación “B de crudo”**

 <p><b>INGENIO LA UNIÓN</b> Responsabilidad &amp; Desarrollo</p>	<b>REPORTE DE MEDICIÓN DE PARTÍCULAS</b>	
	<b>Morphologi®G3</b>	
	Edición 1	10/01/2014
<b>SEGUIMIENTO DE MIELES</b>	Fecha:	15/12/2014

**B DE CRUDO**

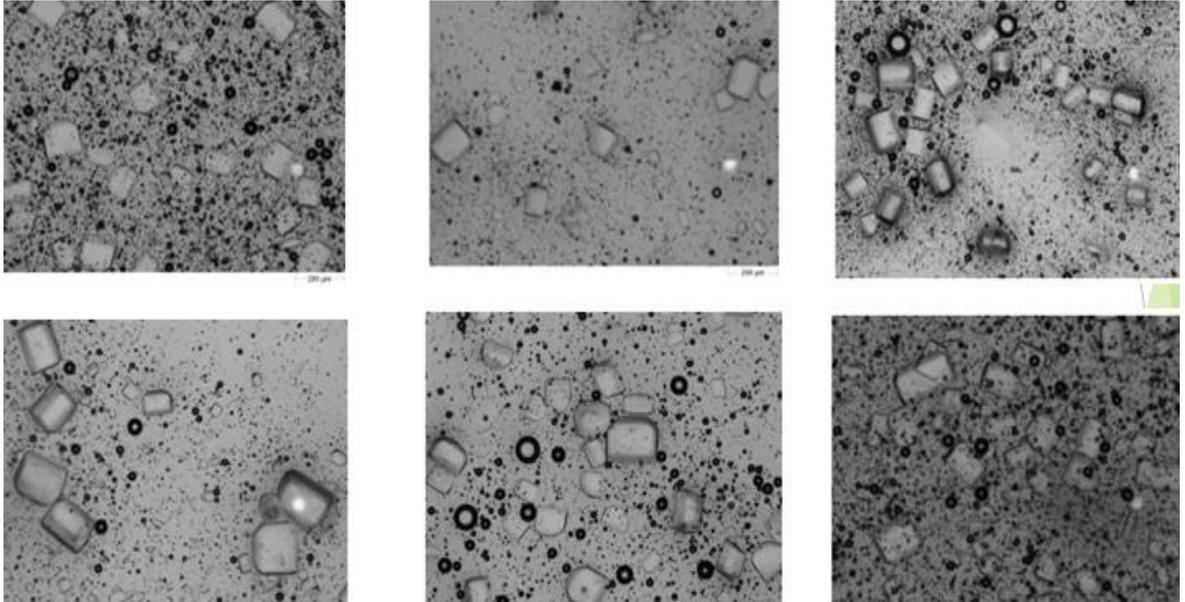


**B DE CRUDO**



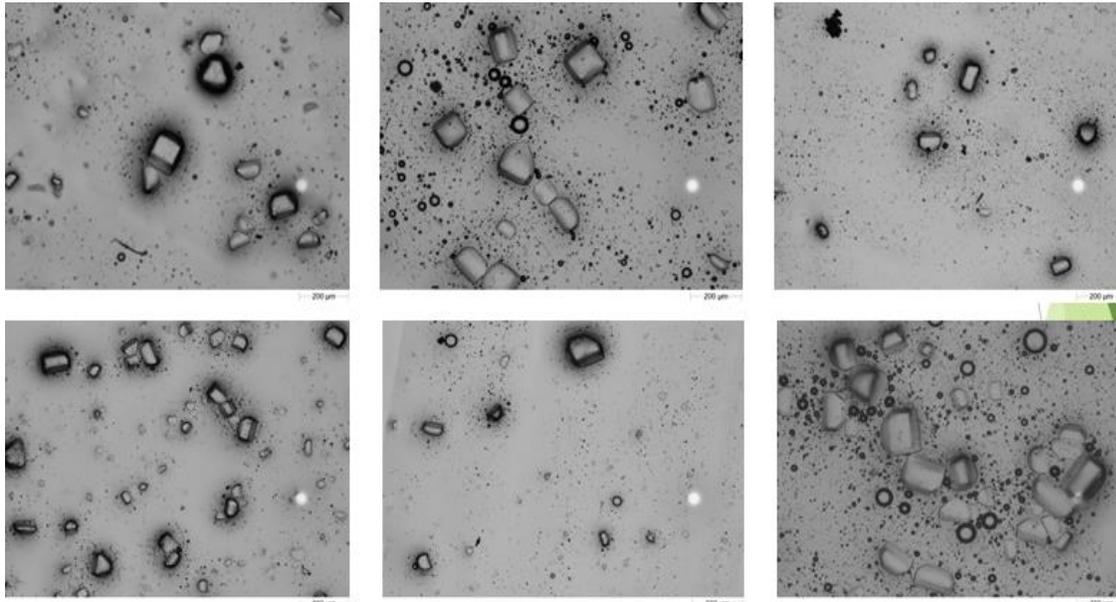
Fuente: referencia 3.

Anexo 3. **Estado de las centrífugas de B de crudo antes de llevar a cabo variaciones en el proceso**



Fuente: referencia 3.

Anexo 4. **Estado de las centrífugas de B de crudo después de llevar a cabo variaciones en el proceso**



Fuente: referencia 3.