



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

**DETERMINACIÓN DEL EFECTO DE LA OPERACIÓN DE UNA ENFRIADORA DE CASCADA  
DE TAMBOR ROTATORIO EN LA VARIABILIDAD GRANULOMÉTRICA DEL AZÚCAR  
OBTENIDO EN UN SISTEMA DE CUATRO MASAS EN UNA REFINERÍA**

**Carlos Enrique Martínez García**

Asesorado por el Ing. Byron de Jesús López Maldonado

Guatemala, noviembre de 2022



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DETERMINACIÓN DEL EFECTO DE LA OPERACIÓN DE UNA ENFRIADORA DE CASCADA  
DE TAMBOR ROTATORIO EN LA VARIABILIDAD GRANULOMÉTRICA DEL AZÚCAR  
OBTENIDO EN UN SISTEMA DE CUATRO MASAS EN UNA REFINERÍA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**CARLOS ENRIQUE MARTÍNEZ GARCÍA**  
ASESORADO POR EL ING. BYRON DE JESÚS LÓPEZ MALDONADO

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO QUÍMICO**

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2022



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Kevin Vladimir Armando Cruz Lorente
VOCAL V	Br. Fernando José Paz González
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
EXAMINADORA	Inga. Ana Rufina Herrera Soto
EXAMINADOR	Ing. Víctor Manuel Monzón Valdez
EXAMINADOR	Ing. César Ariel Villela Rodas
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:

**DETERMINACIÓN DEL EFECTO DE LA OPERACIÓN DE UNA ENFRIADORA DE CASCADA  
DE TAMBOR ROTATORIO EN LA VARIABILIDAD GRANULOMÉTRICA DEL AZÚCAR  
OBTENIDO EN UN SISTEMA DE CUATRO MASAS EN UNA REFINERÍA**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química con fecha 15 de julio de dos mil veinte.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Carlos E. M. García', with a stylized flourish at the end.

**Carlos Enrique Martínez García**



Guatemala 28 de julio de 2022

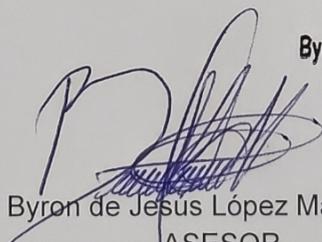
Ingeniero  
Williams Guillermo Álvarez Mejía  
DIRECTOR  
Escuela Ingeniería Química  
Presente.

Estimado Ingeniero Álvarez:

Le saludo cordialmente, deseándole éxitos en sus actividades. Por medio de la presente hago constar que he revisado y aprobado el Informe Final del trabajo de graduación titulado: "**DETERMINACIÓN DEL EFECTO DE LA OPERACIÓN DE UNA ENFRIADORA DE CASCADA DE TAMBOR ROTATORIO EN LA VARIABILIDAD GRANULOMÉTRICA DEL AZÚCAR OBTENIDO EN UN SISTEMA DE CUATRO MASAS EN UNA REFINERÍA**", elaborado por el estudiante de la carrera de Ingeniería Química, Carlos Enrique Martínez García quien se identifica con el registro académico 201513798 y con el CUI 3432 26154 2214.

Agradeciendo la atención a la presente, me suscribo de usted,

Atentamente,

  
Byron de Jesús López Maldonado  
Ingeniero Químico  
Colegiado 1066

Byron de Jesús López Maldonado  
ASESOR  
Ingeniero Químico  
Jefe de Fabricación y Refinería  
Colegiado activo no. 1066





Guatemala, 24 de agosto de 2022.  
Ref. EIQ.TG-IF.020.2022.

Ingeniero  
Williams Guillermo Álvarez Mejía  
DIRECTOR  
Escuela de Ingeniería Química  
Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero Álvarez:

Como consta en el registro de evaluación, correlativo **027-2020**, le informo que reunidos los Miembros de la Terna nombrada por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del:

**INFORME FINAL**

Solicitado por el estudiante universitario: **Carlos Enrique Martínez García.**

Identificado con número de carné: **3432261542214.**

Identificado con registro académico: **201513798.**

Previo a optar al título de la carrera: **Ingeniería Química.**

En la modalidad: **Informe Final, Seminario de Investigación.**

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:

**DETERMINACIÓN DEL EFECTO DE LA OPERACIÓN DE UNA ENFRIADORA DE CASCADA DE TAMBOR ROTATORIO EN LA VARIABILIDAD GRANULOMÉTRICA DEL AZÚCAR OBTENIDO EN UN SISTEMA DE CUATRO MASAS EN UNA REFINERÍA**

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por:

**Byron De Jesús López Maldonado, profesional de la Ingeniería Química**

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

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”



Estuardo Monroy  
Ingeniero Químico  
Carné No.446

Estuardo Edmundo Monroy Benítez  
profesional de la Ingeniería Química  
COORDINADOR DE TERNA  
Tribunal de Revisión  
Trabajo de Graduación

C.c.: archivo







LNG.DIRECTOR.209.EIQ.2022

El Director de la Escuela de Ingeniería Química de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor, el visto bueno del Coordinador de Área y aprobación del área de lingüística del trabajo de graduación titulado: **DETERMINACIÓN DEL EFECTO DE LA OPERACIÓN DE UNA ENFRIADORA DE CASCADA DE TAMBOR ROTATORIO EN LA VARIABILIDAD GRANULOMÉTRICA DEL AZÚCAR OBTENIDO EN UN SISTEMA DE CUATRO MASAS EN UNA REFINERÍA**, presentado por: **Carlos Enrique Martínez García**, procedo con el Aval del mismo, ya que cumple con los requisitos normados por la Facultad de Ingeniería.

*“Id y Enseñad a Todos”*

  
Ing. Williams G. Alvarez  M.I.Q., M.U.I.E.  
DIRECTOR  
Escuela de Ingeniería Química

Guatemala, octubre de 2022.



Decanato  
Facultad de Ingeniería  
24189101- 24189102  
secretariadecanato@ingenieria.usac.edu.gt

LNG.DECANATO.OI.691.2022

La Decana 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: **DETERMINACIÓN DEL EFECTO DE LA OPERACIÓN DE UNA ENFRIADORA DE CASCADA DE TAMBOR ROTATORIO EN LA VARIABILIDAD GRANULOMÉTRICA DEL AZÚCAR OBTENIDO EN UN SISTEMA DE CUATRO MASAS EN UNA REFINERÍA**, presentado por: **Carlos Enrique Martínez García**, después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

  
Inga. Aurelia Anabeía Cordova Estrada  
Decana



Guatemala, noviembre de 2022

AACE/gaoc



## **ACTO QUE DEDICO A:**

<b>Dios</b>	Por bendecirme y brindarme soporte espiritual, amor y fuerza durante mi proceso de aprendizaje.
<b>Mi madre</b>	Lilian García. Por ser pilar en mi vida y el ejemplo de amor y superación más importante en mi vida.
<b>Mi padre</b>	Carlos Martínez. Por ser inspiración en mis estudios y motivarme a conocer más.
<b>Mis hermanas</b>	Karla, Vivian y Carmen. Por apoyarme y motivarme a seguir adelante.
<b>Mis tíos</b>	Magdalena y Otto Levine. Por ser una importante influencia en mi desarrollo profesional.
<b>Mi novia</b>	Estefanía Samayoa. Por motivarme, darme su amor y compañía incondicional.



## **AGRADECIMIENTOS A:**

**Universidad de San  
Carlos de Guatemala**

Por brindarme una educación de excelencia y enseñarme mucho.

**Facultad de Ingeniería**

Por ser una importante influencia en mi carrera y desarrollo profesional como humano.

**Mis amigos de la  
Facultad**

Por apoyarme, motivarme a seguir adelante y ser parte importante de mi desarrollo profesional.

**Ing. Byron López**

Por ser una importante influencia en mi desarrollo profesional y humano. Por apoyarme en el desarrollo de mi trabajo de grado, brindarme su experiencia y asesoría profesional.

**Ingenio Santa Ana**

Por permitirme adquirir experiencia laboral y permitirme desarrollarme profesionalmente.

**Estuardo Monroy**

Por apoyarme en el desarrollo de mi trabajo de grado, brindarme su experiencia y asesoría profesional.



## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS .....	VII
GLOSARIO .....	IX
RESUMEN.....	XIII
OBJETIVOS.....	XV
HIPÓTESIS.....	XVII
INTRODUCCIÓN .....	XIX
1. ANTECEDENTES .....	1
2. MARCO TEÓRICO.....	5
2.1. Obtención de Azúcar en Guatemala.....	5
2.2. Caña de azúcar .....	5
2.3. Recepción y preparación .....	5
2.3.1. Transporte de la caña.....	6
2.3.2. Ingreso al patio de caña .....	6
2.3.3. Cortado y desfibrado de caña.....	6
2.3.4. Extracción del jugo de caña.....	7
2.3.5. Clarificación del jugo de caña .....	8
2.3.6. Sulfitación de jugo .....	9
2.3.7. Alcalización del jugo .....	9
2.3.8. Calentamiento de jugo.....	10
2.3.9. Filtración de lodos en clarificador .....	10
2.3.10. Evaporación.....	11

2.3.11.	Clarificación de meladura .....	13
2.3.12.	Agotamiento y Cristalización .....	15
2.3.13.	Producción de azúcar refinado .....	15
2.3.14.	Centrifugación .....	16
2.3.15.	Acondicionamiento .....	16
2.3.16.	Almacenamiento.....	18
2.4.	Métodos analíticos .....	18
2.4.1.	Granulometría .....	18
3.	DISEÑO METODOLÓGICO.....	21
3.1.	Variables .....	21
3.2.	Delimitación de campo de estudio .....	21
3.3.	Recursos humanos disponibles .....	22
3.4.	Recursos materiales disponibles.....	22
3.4.1.	Materia prima .....	22
3.4.2.	Instrumentos de medición .....	22
3.4.3.	Equipo Auxiliar .....	22
3.4.4.	Cristalería .....	23
3.5.	Técnica cuantitativa.....	23
3.5.1.	Recolección y ordenamiento de la información .....	23
3.5.1.1.	Ubicación y recolección de muestras .....	23
3.5.1.2.	Proceso de recolección de muestras .....	24
3.5.1.3.	Identificación y control de muestras .....	24
3.5.2.	Análisis de granulometría .....	24
3.6.	Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información.....	25
3.7.	Análisis estadístico.....	30
3.7.1.	Comprobación de medias apareadas.....	30

CONCLUSIONES .....	41
RECOMENDACIONES .....	43
REFERENCIAS .....	45
APÉNDICES .....	49
ANEXOS .....	55



## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1.	Diagrama de la descarga de caña a mesas alimentadoras y posterior preparación por el sistema de picadora y desfibradora .....	7
2.	Imbibición compuesta.....	8
3.	Torre de sulfitación con quemador de azufre .....	9
4.	Intercambiador de calor de concha y tubos.....	10
5.	Clarificador Dorr Oliver .....	11
6.	Evaporador tipo Roberts.....	12
7.	Sistema de evaporación de múltiple efecto .....	13
8.	Sistema de clarificación de meladura .....	14
9.	Diagrama de sistema de cuatro etapas para refinar azúcar .....	16
10.	Sistema de secado y enfriamiento .....	17
11.	Dispositivo vibrador para tamizaje.....	19
12.	Coeficiente de variación (CV) para la entrada y salida de la enfriadora de cascada de tambor rotatorio.....	33
13.	Tamaño medio (MA) de los cristales de sacarosa para la entrada y salida de la enfriadora de cascada de tambor rotatorio.....	34
14.	Retención de cristales finos de sacarosa que pasan la malla 115 para la entrada y salida de la enfriadora de cascada de tambor rotatorio .....	35

## TABLAS

I.	Descripción de las variables cuantificables.....	21
II.	Datos del tamaño de los cristales analizados en cada muestra tomados antes de aplicar el tratamiento de enfriado en tachos de refinería.....	25
III.	Datos del coeficiente de variación y cristales que pasan la malla 115 antes de aplicar el tratamiento de enfriado en tachos de refinería.....	26
IV.	Datos del tamaño de los cristales analizados en cada muestra después de aplicar el tratamiento de enfriado en tachos de refinería.....	28
V.	Datos del coeficiente de variación y cristales que pasan la malla 115 antes de aplicar el tratamiento de enfriado en tachos de refinería.....	29
VI.	Comparación de medias apareadas para los valores de tamaño promedio, coeficiente de variación y retención en la bandeja final de los cristales de sacarosa antes y después de realizar el tratamiento. ....	31

## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
<b>AM</b>	Abertura media
<b>Atm</b>	Atmósfera
<b>SS</b>	Coeficiente de sobresaturación
<b>CV</b>	Coeficiente de variación
<b>Pol</b>	Contenido de sacarosa
<b>P</b>	Estadístico bilateral
<b>°Bx</b>	Grados Brix
<b>°C</b>	Grados Celcius
<b>H<sub>1</sub></b>	Hipótesis alternativa
<b>H<sub>0</sub></b>	Hipótesis nula
<b>G</b>	Masa de muestra
<b>X</b>	Media
<b>μm</b>	Micrómetro
<b>nm</b>	Nanómetro
<b>%</b>	Porcentaje
<b>MA</b>	Tamaño medio de los cristales de sacarosa



## GLOSARIO

<b>Azúcar</b>	Es un disacárido que se obtiene principalmente de la caña de azúcar o remolacha, compuesta esencialmente por sacarosa.
<b>Batch</b>	Proceso por lotes o discontinuo.
<b>CENGICAÑA</b>	Centro Guatemalteco de Investigación y Capacitación de la Caña
<b>Cristalización</b>	El proceso que consiste en iniciar el desarrollo de los cristales de sacarosa.
<b>Coeficiente de variación</b>	Es una medida estadística que nos informa acerca de la dispersión relativa de un conjunto de datos.
<b>Granulometría</b>	Parte de la petrografía que trata de la medida del tamaño de las partículas, granos y rocas de los suelos.
<b>ICC</b>	Instituto Privado de Investigación sobre Cambio Climático.
<b>Masa cocida</b>	Material en el que se encuentran mezclados la miel agotada a una pureza determinada y los cristales desarrollados a un tamaño establecido, en su proceso final de cocción.

<b>Pureza</b>	La pureza real representa el contenido de sacarosa expresado como porcentaje de la sustancia seca o el contenido de sólidos disueltos.
<b>Polvillo</b>	Cristales de sacarosa con un tamaño de partícula menor a 115 micrómetros.
<b>Sacarosa</b>	El compuesto químico puro $C_{12}H_{22}O_{11}$ que es conocido como azúcar blanco, un disacárido a partir de la unión de la glucosa y fructosa.
<b>Sobresaturación</b>	Solución que ha pasado el límite de soluto que el solvente puede disolver a ciertas condiciones de temperatura, por lo que este exceso de soluto aparece como un precipitado.
<b>Sólidos disueltos</b>	Todo material soluto que está en solución, incluyendo la sacarosa, monosacáridos, cenizas y ácidos grasos entre otras impurezas orgánicas.
<b>Tacho</b>	Equipo diseñado para desarrollar el tamaño del cristal de sacarosa, por la eliminación de agua mediante la ebullición del material que contiene a presión reducida.
<b>Tándem de tamices</b>	Serie de cedazos que se emplean para separar partículas por su diferencia de tamaño.

**Templa**

Masa cocida que fue llevada a su punto final de cocimiento y fue descargada de un tacho discontinuo o por lote.



## RESUMEN

El presente trabajo de graduación tiene como objetivo evaluar la operación de una enfriadora de cascada de tambor rotatorio en el tamaño medio de los cristales, coeficiente de variación y retención de cristales que pasa la malla 115 (finos o polvillo) del tambor de tamices, mediante un análisis de granulometría, en la fabricación de azúcar de refino en una refinería de un ingenio.

Se analizó muestras en un sistema de cuatro plantas en una refinería de un ingenio azucarero en el departamento de Escuintla, Guatemala. Se tomó muestras de azúcar a la entrada de la enfriadora de tambor rotatorio y a la salida de esta. Se procedió a realizar un análisis de granulometría en el laboratorio. Se realizó un análisis comparativo de los resultados de granulometría entre los puntos de muestreo anteriormente descritos en función del coeficiente de variación, tamaño medio del grano y retención de cristales de azúcar que pasan la malla 115 en un tándem de tamices.

Se determinó que el coeficiente de variación del tamaño medio de los cristales aumentó significativamente por el paso en este equipo. Asimismo, se observó que el tamaño medio del grano disminuyó significativamente y que la cantidad retenida de polvillo fue mucho mayor en la salida del equipo respecto a la entrada de este, lo que indicó que los cristales de sacarosa se degradan por el paso en el equipo de enfriamiento.

El estudio experimental se realizó en un Ingenio en el área de Fabricación y Refinería, bajo condiciones ambientales de 32 °C de temperatura aproximadamente y 0.98 atm de presión según datos recaudados por el ICC.



# OBJETIVOS

## General

Determinar el efecto de la operación de una enfriadora de cascada de tambor rotatorio en la variabilidad granulométrica del azúcar obtenido en sistema de cuatro masas en una refinería.

## Específicos

1. Calcular y graficar el comportamiento del coeficiente de variación (CV) a partir de los resultados de un análisis de granulometría para la etapa de enfriamiento de templeas de refinería.
2. Calcular y graficar el comportamiento del tamaño medio (MA) de los cristales mediante un análisis de granulometría para la etapa de enfriamiento de templeas de refinería.
3. Calcular y graficar el comportamiento del porcentaje de cristales finos que pasan la malla 115 del tambor de tamices, mediante un análisis de granulometría, en la etapa de enfriamiento para las templeas de refinería.
4. Determinar por medio de una prueba t de diferencias pareadas, si existe diferencia significativa del coeficiente de variación, tamaño medio de los cristales y retención de finos que pasan la malla 115, después del tratamiento en la enfriadora de cascada de tambor rotatorio.



# HIPÓTESIS

## **Hipótesis de estudio**

Es posible determinar la variabilidad en los parámetros de coeficiente de variación, tamaño medio de los cristales y retención de cristales finos, en la operación de una enfriadora de cascada de tambor rotatorio en la producción de azúcar refino.

## **Hipótesis estadística:**

### **Hipótesis nula:**

$H_{0,1}$ : No existe diferencia significativa en el coeficiente de variación de las plantas de refinación en la etapa de enfriamiento.

$H_{0,2}$ : No existe diferencia significativa en el tamaño medio de los cristales de las plantas de refinación en la etapa de enfriamiento.

$H_{0,3}$ : No existe diferencia significativa en la cantidad de cristales finos retenidos de las plantas de refinación en la etapa de enfriamiento.

### **Hipótesis alterna:**

$H_{a,1}$ : Existe diferencia significativa en el coeficiente de variación de las plantas de refinación en la etapa de enfriamiento.

H<sub>a,2</sub>: Existe diferencia significativa en el tamaño medio de los cristales de las plantas de refinación en la etapa de enfriamiento.

H<sub>a,3</sub>: Existe diferencia significativa en la cantidad de cristales finos retenidos de las plantas de refinación en la etapa de enfriamiento.

## INTRODUCCIÓN

Los ingenios azucareros buscan la transformación de la sacarosa presente en la caña de azúcar en forma de cristales comerciales; para llevar a cabo este proceso de transformación se realiza una serie de procesos físicos y químicos como la extracción, purificación, evaporación y centrifugación, que permiten obtener el producto final que hoy se conoce como azúcar. En el proceso de fabricación se busca que los cristales producidos tengan una calidad definida basada en la determinación del aspecto, color en solución, ceniza, contenido de humedad y distribución del tamaño del grano (Mathlouthi, 2014).

Todos estos parámetros de calidad dependen de la forma en que se realizó la cristalización, el lavado que se realizó en las centrifugas, así como en condiciones de secado, enfriamiento, manipulación y almacenamiento (Mathlouthi, 2014). Dentro de las características de calidad relacionadas con el tamaño del grano de azúcar, se encuentra el coeficiente de variación, el cual manifiesta la uniformidad en el tamaño de los granos y la dispersión de los mismos, respecto a la abertura media (Perry, 2001). Los valores bajos de este parámetro indican alta uniformidad del tamaño del grano de azúcar. Esto se determina mediante un análisis de granulometría, en el cual se establece el tamaño del grano en mayor proporción (Chen, 1999). También se puede analizar el comportamiento de granos gruesos y finos, para establecer el tamaño promedio tanto de los granos gruesos como los granos finos.

Debido a que los ingenios buscan obtener valores bajos del coeficiente de variación, es necesario conocer la variación en la distribución del tamaño del

grano con respecto a los procesos de transformación y acondicionamiento de los granos y los equipos que se utilizan para estas operaciones.

Por dicha razón el presente trabajo de investigación tiene como objetivo conocer la operación de una enfriadora de cascada de tambor rotatorio y la variabilidad del tamaño medio del grano en la etapa de enfriamiento de azúcar de refino, asimismo, para comprender los orígenes de la inestabilidad en el coeficiente de variación del azúcar refinado y para explicar la formación de polvillo.

## 1. ANTECEDENTES

En los últimos años la exportación de azúcar de caña en Guatemala ha aumentado (CENGICAÑA, 2014), debido al crecimiento industrial que devenga el azúcar como una materia prima importante para los procesos de elaboración de alimentos, bebidas, consumo diario en los hogares y productos afines con el uso de la misma. Debido a que se cuenta con tiempo limitado de producción de azúcar que está en función de la cosecha de la caña, donde la ineficiencia de la producción presente en la cristalización en los tachos e irregularidades en la calidad de los cristales genera pérdidas monetarias en la producción, debido a tener que reprocesar el producto (Fernández, Hernández y Viera, 2011). Debido a esto se han realizado estudios para determinar las causas de la inestabilidad de las características de los cristales de sacarosa como el coeficiente de variación, tamaño medio del grano y la generación de polvillo (finos) en el proceso de extracción de azúcar.

En el libro de Ingeniería de la Caña de Azúcar se menciona que la principal desventaja de los enfriadores de cascada de tambor rotatorio es el daño que pueden generar a los cristales de sacarosa debido al movimiento de agitación rotativa y las repetidas caídas que sufren durante la etapa de enfriamiento. Asimismo, (Rein, 2012) menciona que esto causa cierto desgaste o raspaduras a las superficies de los cristales, causando pérdidas del brillo de los cristales y formación de cierta cantidad de polvillo.

En un estudio realizado por la Asociación Andrew VanHook, se observó cristales de azúcar blanco calcáreo cuando la cantidad de polvo es alta y que esto se origina en caso de abrasión por mallas metálicas y rollos o rasguños en

enfriadores de tambor (Rogé, Mathlouthi y Hinkova, 2014). Asimismo, observó formas irregulares, especialmente agujas, cuando se cultiva sacarosa en presencia de impurezas específicas como la dextrana o rafinosa; también establece que un gran valor del coeficiente de variación de cristales de azúcar puede tener como origen el uso de semillas con distribución de gran tamaño, nucleación espontánea y cambios rápidos en vacío o temperatura durante la ebullición.

En la Facultad Ingeniería Química, Universidad de Oriente, Cuba, se realizó un estudio que lleva como nombre <<*Modelos para el cálculo de la constante de velocidad de cristalización del azúcar comercial en tachos*>>, debido a que los cristales de azúcar comercial no siempre alcanzan su tamaño establecido sobre malla Tyler 20, genera problemas por rechazos en los puertos de embarque y gastos por ser reprocesados o la venta a menor precio en el mercado local, afectando el balance económico del ingenio (Fernández et al., 2011).

En un estudio realizado por Powder Technology se establece que las consecuencias de los defectos del cristal de azúcar son numerosas y económicamente perjudiciales para un ingenio. Menciona que un enfriador de cascada puede conducir a la formación de partículas finas por diferentes mecanismos de rotura (Verkoeijen, Meesters, Vercoulen y Scarlett, 2002). Dependiendo de la fuerza aplicada y su dirección, determinaron diferentes mecanismos de rotura observados denominados como desgaste, abrasión, fractura, fragmentación y astillado. Asimismo, observaron que el tamaño de partícula después del desgaste o abrasión, el desgaste permanece casi igual y la forma se vuelve más redonda. Durante el astillado, pequeño los pedazos de partículas se rompen y la partícula se vuelve más áspera. Observaron que la fractura y fragmentación producen pequeños fragmentos, lo que reduce el

tamaño promedio de las partículas, aumenta el coeficiente de dispersión y aumenta la cantidad de polvillo.

En un artículo publicado en *International Sugar Journal*, se determinó que la formación de fragmentos de partículas y el cambio en el tamaño y la forma de los cristales hacen que los cristales de azúcar sean más reactivos al vapor de agua. Esto está directamente relacionado con la aptitud del azúcar blanco para aterrarse. Se encontró que el factor más perjudicial en la fluidez del azúcar es una gran cantidad de partículas finas (por encima del 10 %), (Rogé & Mathlouthi, 2003).

En un estudio publicado en el *Journal of Science and Engineering Investigations* para investigar la explosibilidad de polvos industriales de alimentos y para determinar el efecto de los tamaños de partícula en algunos de los parámetros de explosión de polvo en el aire. Se indica que las explosiones de polvo en las industrias alimentarias han causado accidentes industriales que resultan en muchas muertes, daños estructurales y efectos devastadores. En esta investigación sobre polvos explosivos en las industrias alimentarias se menciona que las operaciones industriales más comunes que producen polvo en las industrias alimentarias incluyen fresado, molienda, secado/enfriamiento, transporte y almacenamiento. Determinó que, a menor tamaño de partícula, menor temperatura de ignición, (Sweis, 2020).

Un estudio realizado en 2019 por el Ministerio de Trabajo, Migraciones y Seguridad Social por el gobierno de España menciona que existen diferentes problemas de salud relacionados con el polvo en suspensión. Los pulmones van a reaccionar al polvo dependiendo del lugar en el que las partículas se establezcan. Si las partículas llegan a las vías respiratorias pueden producir una inflamación de la tráquea (traqueítis) o de los bronquios (bronquitis). Asimismo,

establece que las partículas suspendidas de un tamaño de 10 a 50 micras pueden ser retenidas en la garganta y nariz, sin embargo, para las partículas finas (inferiores a 5 micras) pueden estar en el origen sobre todo de enfermedades broncopulmonares, como asma, rinitis y la alveolitis que pueden evolucionar incluso hacia una fibrosis pulmonar (Comisión Europea, Fiscalidad y Unión Aduanera, 2012).

## **2. MARCO TEÓRICO**

### **2.1. Obtención de Azúcar en Guatemala**

El proceso de extracción de azúcar de caña consiste en varias etapas, las cuales se resumen en: recepción y manejo de caña en patio, preparación de caña, extracción de jugo en molinos, clarificación del jugo, evaporación, clarificación de meladura, cristalización, centrifugación y acondicionamiento.

### **2.2. Caña de azúcar**

Es una gramínea tropical que pertenece a la misma tribu que la del sorgo, el pasto Johnson y el maíz (Chen, 1999). Posee un tallo leñoso de dos a cinco metros de altura con cinco o seis cm de diámetro. El tallo acumula un jugo rico en sacarosa, el cual se busca para ser extraído y cristalizado en un ingenio. La sacarosa es sintetizada por la caña por medio de la fotosíntesis al biosintetizar el dióxido de carbono y el agua en moléculas de sacarosa, posee hojas que llegan a alcanzar de dos a cuatro metros de longitud y favorecen la captación de luz solar. El crecimiento de la caña se favorece en condiciones de temperatura y humedad alta, con muchas horas de sol, para poder aprovecharlo y realizar la fotosíntesis de manera adecuada (EcuRed, 2013).

### **2.3. Recepción y preparación**

El proceso de extracción de azúcar de caña consiste en varias etapas que se considerarán a continuación.

### **2.3.1. Transporte de la caña**

La recolección de la caña se lleva a cabo entre los once y los dieciséis meses de plantación. Se quema la plantación para eliminar las malezas que impiden el corte de la caña y que producen un incremento en los sólidos de desecho en el proceso. Luego la caña se corta de forma manual o mecanizada y por último cargada a jaulas para ser transportadas por camiones al ingenio (CENGICAÑA, 2014).

### **2.3.2. Ingreso al patio de caña**

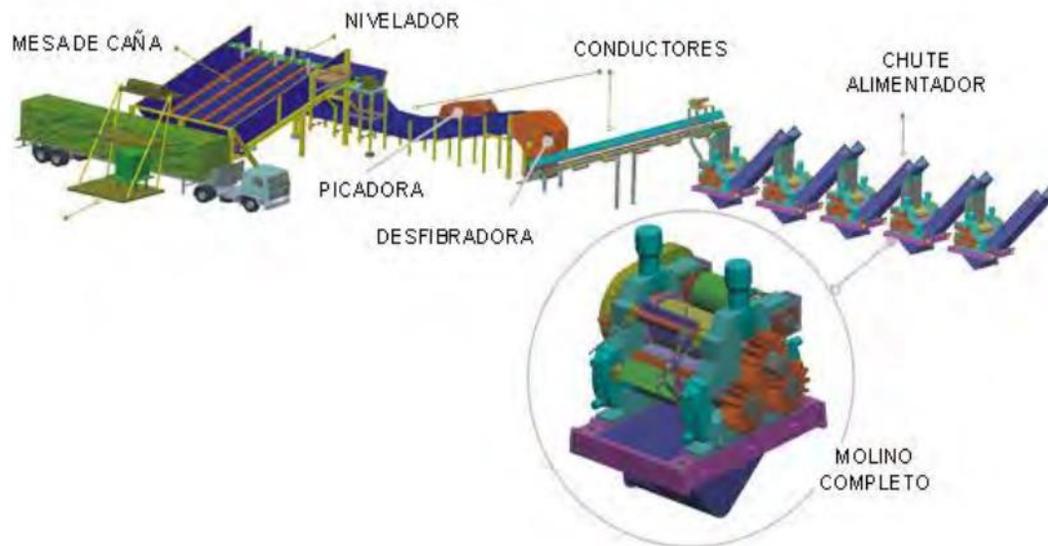
Al ingresar al ingenio, se pesa en básculas y se procede a realizar análisis por el laboratorio de caña, que toma muestras aleatorias por medio de un muestreador de núcleos, posteriormente se determina la cantidad de sacarosa, fibra y otras variables de interés para evaluar la calidad que trae la caña de las diferentes fincas. Esto se hace con el fin de obtener una referencia para la evaluación del rendimiento y eficiencia del proceso de obtención de azúcar. Posteriormente, la caña se descarga en mesas de alimentación por medio de viradores y se remueve la mayor cantidad de material extraño como tierra, basura, metales y piedras para permitir que se inicie el proceso de la forma más limpia (Chen, 1999).

### **2.3.3. Cortado y desfibrado de caña**

Las jaulas transportadas por los camiones vierten la caña en la mesa de caña, la cual consiste en una gran bandeja inclinada con cadenas motrices y un nivelador o eje con dientes para nivelar los tallos y emparejar la alimentación, luego pasa a una troceadora, otro eje con machetes que trocea la caña en pedazos que caen luego al conductor de caña (CENGICAÑA, 2014).

Los trozos de caña pasan a un conductor de caña, donde son transportados hacia un nivelador que apelmaza el colchón y pasa a través de una picadora y posteriormente a una desfibradora, en donde se desmenuza la caña, para facilitar el proceso de extracción de jugo (Chen, 1999).

Figura 1. **Diagrama de la descarga de caña a mesas alimentadoras y posterior preparación por el sistema de picadora y desfibradora**



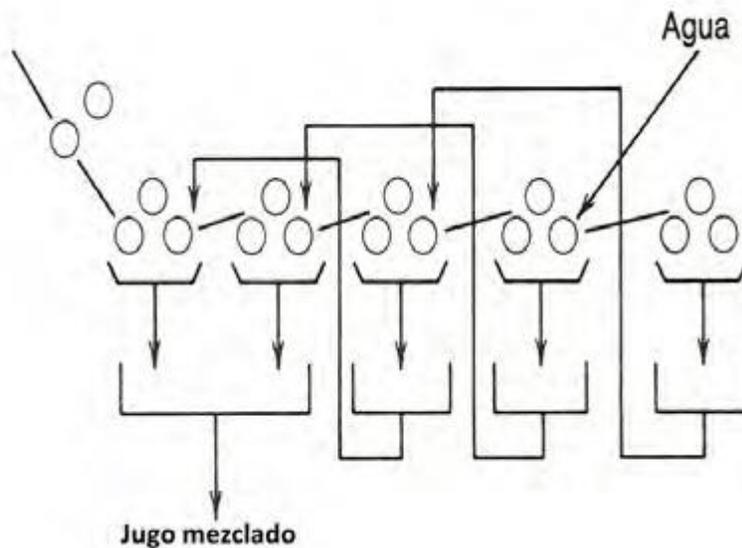
Fuente: Cengicaña, (2014). *El cultivo de la caña de azúcar en Guatemala*.

#### 2.3.4. Extracción del jugo de caña

El bagazo preparado pasa por un tándem de cinco molinos que extraen el jugo o guarapo del bagazo ingresado, cada molino consiste en cuatro masas por las cuales pasa la caña preparada y se aplica presión para extraer el jugo y luego dejar bagazo residual que sirve para la alimentación del siguiente. Se utiliza agua de imbibición, para extraer por medio de lixiviación la mayor cantidad posible de

sólidos solubles y completado por una maceración compuesta. El bagazo restante con bajo contenido de sacarosa o pol, es transportado al área de calderas para su posterior utilización (Chen, 1999).

Figura 2. **Imbibición compuesta**



Fuente: Chen, (1999). *Manual del azúcar de caña*.

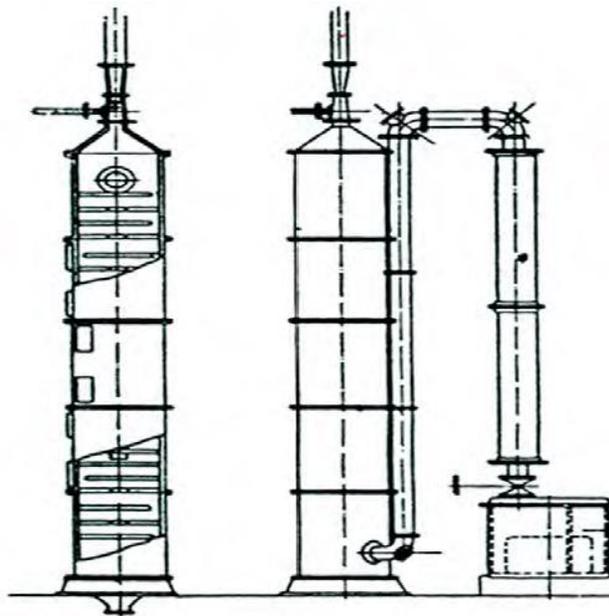
### 2.3.5. **Clarificación del jugo de caña**

El jugo obtenido se lleva al tratamiento de clarificación, este consiste en varias etapas que tienen como objetivo la máxima remoción impurezas en la etapa más temprana del proceso que permitan las otras consideraciones del mismo, tales como la claridad y reacción del jugo claro.

### 2.3.6. Sulfitación de jugo

El jugo se pone en contacto por medio de un sistema en contracorriente con dióxido de azufre, producido por la quema de azufre en un horno, esto para disminuir el color del jugo, aumentar el brillo, eliminar microorganismos y disminuir la viscosidad del jugo (Hugot, 1963).

Figura 3. Torre de sulfitación con quemador de azufre



Fuente: Hugot, (1963). *Manual para ingenieros azucareros*.

### 2.3.7. Alcalización del jugo

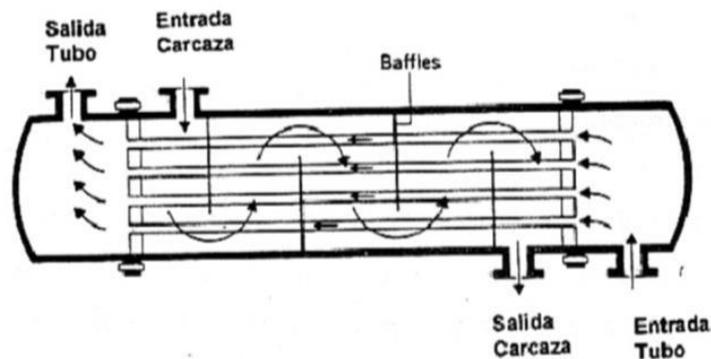
Posteriormente del proceso de sulfitación, se le agrega lechada o sacarato, para neutralizar la acidez del jugo. Esta etapa se conoce como defecación simple, donde se da la formación de un precipitado denso de composición compleja, en parte más ligera y en parte más denso que el jugo, que

contiene sales insolubles de calcio, albúmina coagulada y proporciones variables de ceras, grasas y gomas (Hugot, 1963).

### 2.3.8. Calentamiento de jugo

El jugo alcalizado es luego calentado por etapas hasta llevarlo a su temperatura de ebullición, esto favorece la velocidad de sedimentación, mayor eliminación de fosfatos; mejor nivel de turbiedad; menor volumen de lodos, y mejor color a 420 nm. También se calienta con el fin de proteger el jugo de microorganismos. Posteriormente se lleva a un tanque flash, donde es despresurizado y se expulsa el aire disuelto en el jugo, para acelerar la sedimentación de las partículas sedimentables (CENGICAÑA, 2014).

Figura 4. Intercambiador de calor de concha y tubos



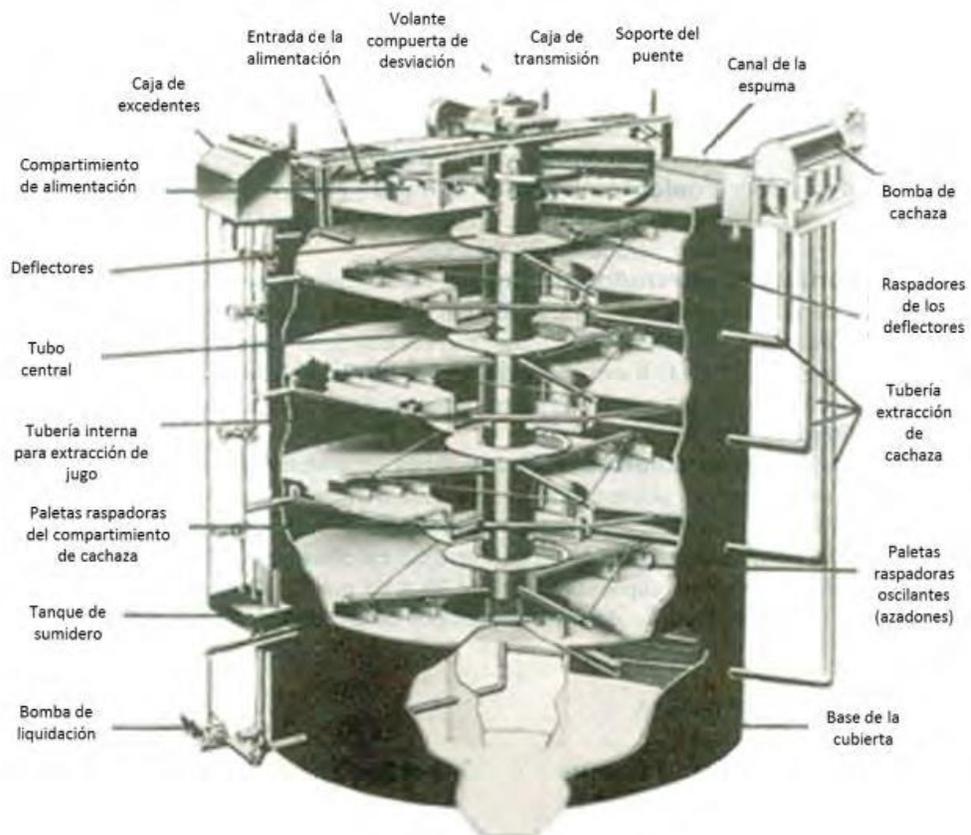
Fuente: CENGICAÑA, (2014). *El cultivo de la caña de azúcar en Guatemala*.

### 2.3.9. Filtración de lodos en clarificador

Al jugo proveniente del tanque *flash* se le agrega floculante, el cual permite atrapar los flóculos formados en las etapas de alcalizado y calentamiento. Luego,

se procede a depositarlo en un clarificador tipo Dorr Oliver donde se separa el jugo clarificado listo para la entrada a la evaporación y los residuos conocidos como cachaza (Chen, 1999).

Figura 5. Clarificador Dorr Oliver



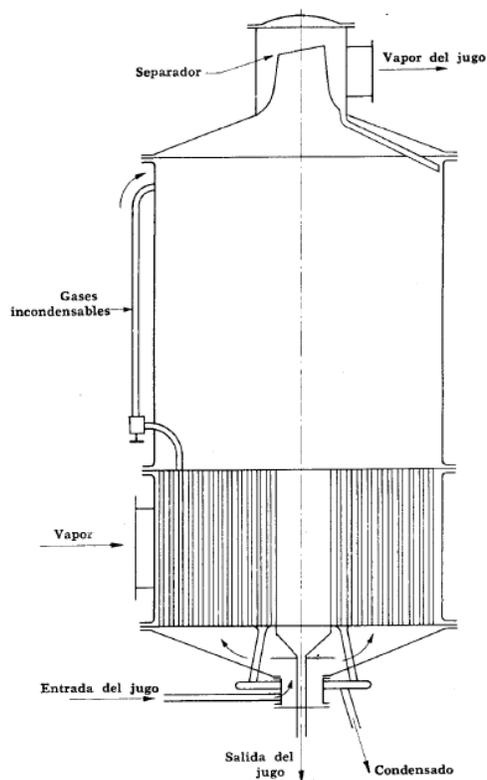
Fuente: Chen, (1999). *Manual del azúcar de caña*.

### 2.3.10. Evaporación

El jugo clarificado se concentra 15-18 °Brix a 65-67 °Brix. Para lograr esto, el agua contenida en el jugo se evapora haciéndola hervir en evaporadores.

Existen distintos tipos de evaporadores, en el ingenio se utiliza el tipo Roberts, el cual consiste en un cuerpo cilíndrico con una calandria en la parte inferior donde entra vapor de lado de la carcasa y dentro de los tubos pasa el jugo al cual se le evapora el agua (Hugot,1963).

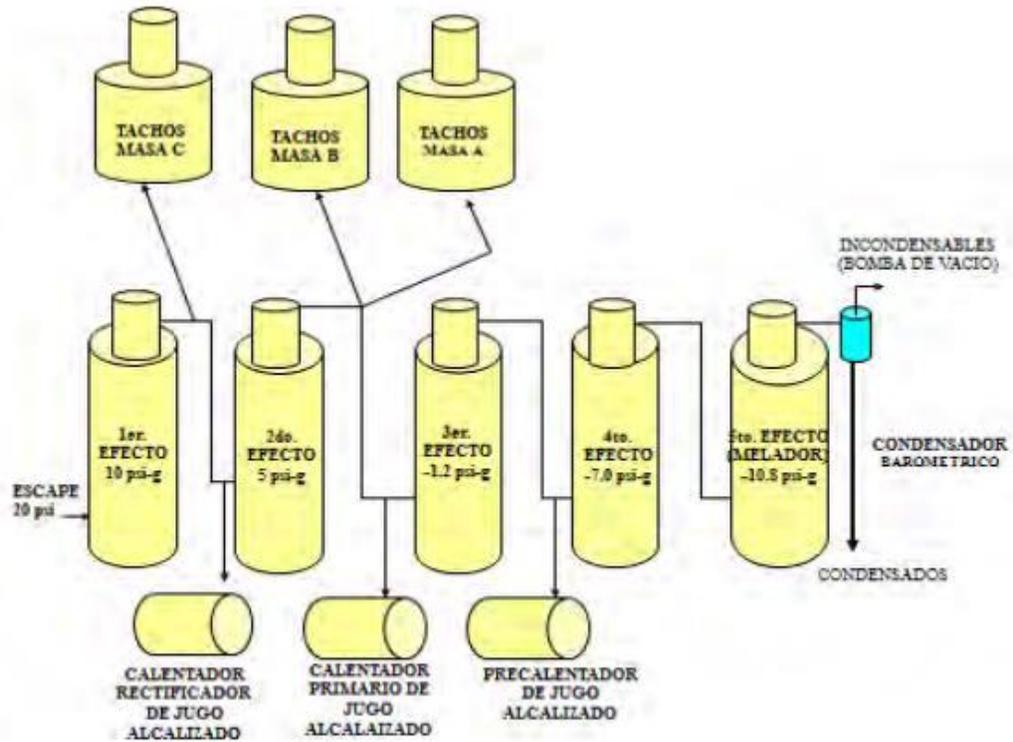
Figura 6. **Evaporador tipo Roberts**



Fuente: Hugot, (1963). *Manual para ingenieros azucareros*.

Los evaporadores se disponen en un arreglo para formar un sistema de evaporación de múltiple efecto, que consiste en alimentar vapor de una fuente viva o vapor de escape proveniente de los turbogeneradores al primer efecto y posteriormente el vapor vegetal que se genera pasa alimentar a los siguientes vasos hasta llegar al último evaporador (CENGICAÑA, 2014).

Figura 7. Sistema de evaporación de múltiple efecto



Fuente: CENGICAÑA, (2014). *El cultivo de la caña de azúcar en Guatemala*.

### 2.3.11. Clarificación de meladura

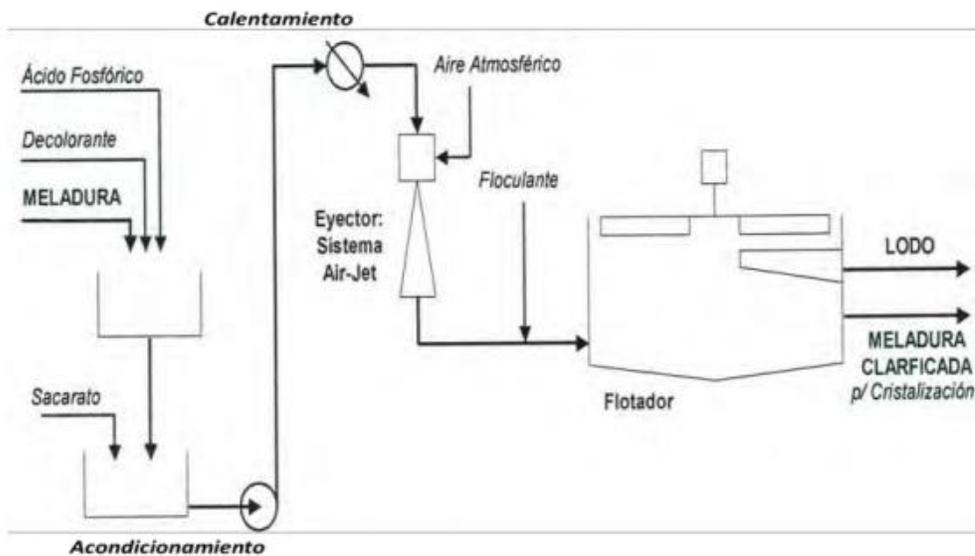
Las impurezas presentes en el jugo claro (color y sólidos suspendidos) se concentran e incrementan durante la evaporación, por lo que, si se está produciendo azúcar blanca sulfitada, estas impurezas deben removerse tanto como sea posible (Hugot, 1963).

La clarificación de la meladura puede realizarse por la combinación de varios subprocesos. En general hay que hacer primero un tratamiento fisicoquímico para acondicionar las impurezas y hacer posible su separación

posterior. Este consiste en formar conglomerados de partículas sólidas y remover sustancias colorantes. Para formar los conglomerados de partículas sólidas se dosifica ácido fosfórico, floculante y cal (como lechada o como sacarato de calcio) (Chen, 1999).

A la meladura se le inyectan pequeñas burbujas de aire que al ascender arrastran los flóculos de impurezas (lodos), formándose una espuma que flota en la superficie de la meladura contenida en los clarificadores. Se utiliza clarificadores de meladura tipo Jacob y los clarificadores de meladura tipo Talo donde se remueve la espuma superficial (CENGICAÑA, 2014).

Figura 8. **Sistema de clarificación de meladura**



Fuente: Cengicaña, (2014). *El cultivo de la caña de azúcar en Guatemala*.

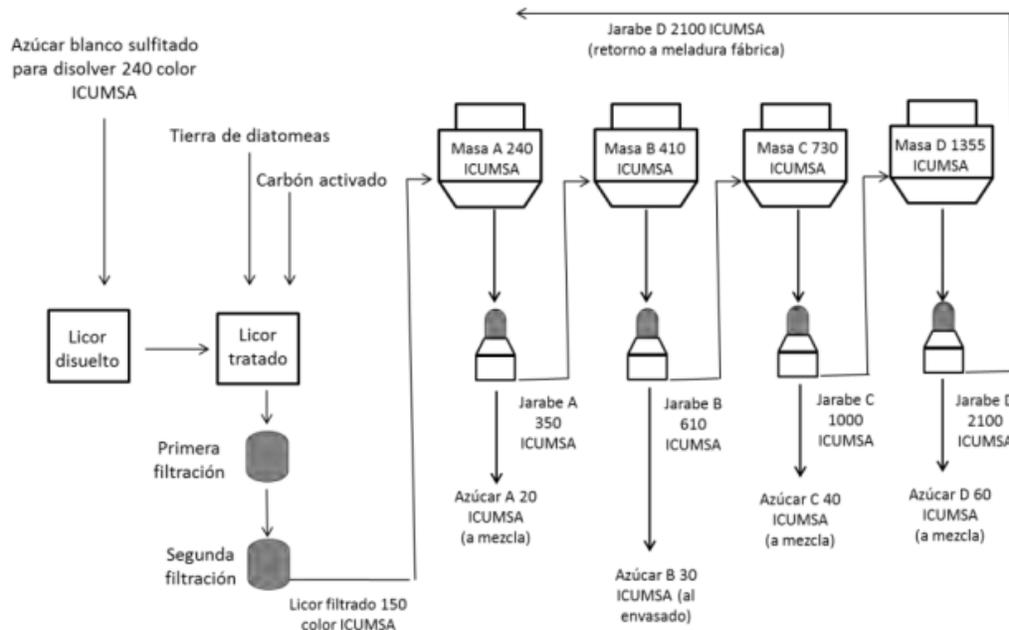
### **2.3.12. Agotamiento y Cristalización**

El proceso de cristalización consiste en iniciar el desarrollo de los cristales de sacarosa. El método más usado es por semillamiento, en este procedimiento la solución azucarada de pureza definida se concentra en el tacho, llevando la concentración de la misma hasta alcanzar un coeficiente de sobresaturación (SS) de entre 1.00 y 1.20, región conocida como zona metaestable, en esta zona los cristales crecen de tamaño, pero no aparecen espontáneamente nuevos núcleos de cristalización o cristales nuevos. En este punto se agrega una cantidad determinada de semilla y se mantiene el régimen de evaporación agregando agua caliente, lo que permite apartar la viscosidad alrededor de los cristales y permite que se definan las caras del cristal (Hugot, 1963).

### **2.3.13. Producción de azúcar refinado**

El proceso para refinar azúcar blanco sulfitado, consiste en disolver azúcar de 230-250 unidades ICUMSA de color producida en la fábrica; el jarabe obtenido se le denomina licor disuelto. El licor disuelto se trata con carbón activado y calor para decolorarlo, simultáneamente se le adiciona tierra de diatomeas como ayuda filtrante. La mezcla obtenida se le denomina licor tratado, el cual se filtra a través de un sistema de filtros primarios. El licor obtenido se pasa por un segundo juego de filtros secundarios llamados rectificadores o pulidores. El licor filtrado final es de alrededor de 150 unidades ICUMSA de color y libre de partículas sólidas suspendidas (CENGICAÑA, 2014).

Figura 9. Diagrama de sistema de cuatro templas para refinar azúcar



Fuente: CENGICAÑA, (2014). *El cultivo de la caña de azúcar en Guatemala*.

### 2.3.14. Centrifugación

La masa cocida en el mezclador es luego vertida en centrífugas, que la separan en los cristales de azúcar de la miel que los contiene. En esta etapa se da la separación del azúcar y las mieles, las cuales sufren un proceso de recristalización logrando con esta el máximo agotamiento y, por consiguiente, la recuperación del azúcar contenido en las mismas (Hugot, 1963).

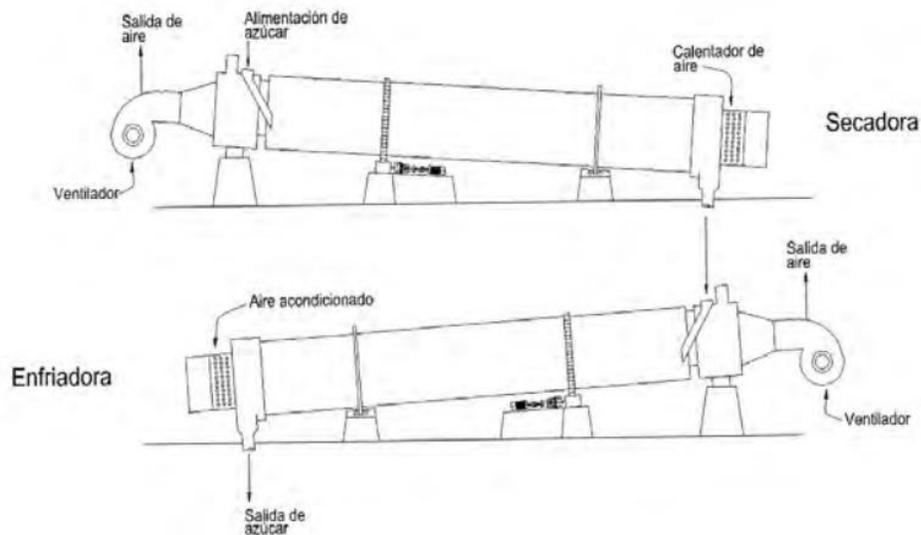
### 2.3.15. Acondicionamiento

El azúcar obtenido de las centrífugas se seca para obtener un producto con características de humedad adecuadas y que son necesarias para su

conservación, ya sea en sacos o silos. El azúcar al salir de las centrífugas sale con aproximadamente 1 % de humedad y al pasar por la secadora esta baja a 0.1 % (CENGICAÑA, 2014).

El azúcar húmedo se somete a dos procesos en secuencia: secado y luego enfriamiento. Para ambos procesos el azúcar atraviesa un cilindro rotativo inclinado, el cual está provisto por una serie de peines que subdividen y provocan una cortina de azúcar transversal al flujo de aire, dicha cortina de azúcar se desplaza longitudinalmente por el ángulo de inclinación del cilindro. En el secado por la cortina de azúcar circula aire caliente en contracorriente, el tiro de aire es producido por un ventilador que está en el extremo de alimentación del cilindro rotativo. El aire que circula por la enfriadora puede ser el aire del ambiente (Rein, 2012).

Figura 10. Sistema de secado y enfriamiento



Fuente: CENGICAÑA, (2014). *El cultivo de la caña de azúcar en Guatemala.*

### **2.3.16. Almacenamiento**

Para el almacenamiento de la azúcar cruda generalmente se utiliza bodegas de granel y es llevada a esta bodega por medio de un sistema de conductores de faja o banda. En algunos lugares se utilizan sacos de polipropileno para almacenamiento (CENGICAÑA, 2014).

## **2.4. Métodos analíticos**

A continuación, se presenta la metodología analítica utilizada para la presente investigación.

### **2.4.1. Granulometría**

La determinación del tamaño de grano mediante el uso de tamices representa un paso importante en lo que se refiere al control de la calidad del azúcar. Esta determinación consiste en tomar una muestra de 100 gramos del azúcar y hacerla atravesar por un tándem de tamices de diferentes aberturas, en un dispositivo vibrador Ro-Tap. La velocidad y tiempo de vibración serán acordes para lograr resultados uniformes (Chen, 1999).

Figura 11. **Dispositivo vibrador para tamizaje.**



Fuente: Cagnazucar (2015). *Tamaño medio y granulometría*. Consulta: 18 marzo 2020.  
Recuperado de <http://cagnazucar.blogspot.com/2015/12/tamano-medio-y-cv-granulometria-en.html>.

El tamaño y la uniformidad de los cristales de azúcar crudo son factores importantes que influyen las propiedades de lavado durante la afinación en refinерías. La forma y tamaño de cristal influye los resultados obtenidos.

Para informar el tamaño del grano se utiliza el Método Powers un denominado sistema de abertura media/coeficiente de variación (AM/CV) y se basa en el supuesto de que la mayoría de los azúcares granulados tienen tamaños de cristal que siguen una distribución normal (Honig, 1959). Al trazar un gráfico de los porcentajes acumulados retenidos en una serie de tamices contra abertura del tamiz sobre un papel de probabilidad aritmética, se obtiene una línea aproximadamente recta. Esta recta permite clasificar un azúcar por una dimensión media (AM) y por un índice (CV) que precisa la variabilidad de las dimensiones alrededor de este valor medio (Chen, 1999).

La abertura de la malla que corresponde a la intersección de esta línea con la línea del 50 % en la gráfica, se define como la Abertura Media (AM), y una criba que tenga un tamaño de malla igual a la MA retendrá el 50 % de la muestra. El Coeficiente de Variación o Dispersión (CV), se define como la desviación estándar expresada como un porcentaje de la Abertura Media. Cuanto menor es el valor de CV, mayor es la uniformidad del tamaño del grano (Chen, 1999).

En caso de que una muestra de azúcar tenga una distribución de tamaños de granos aproximadamente normal, puede calcularse el CV a partir de la diferencia entre las aberturas correspondientes a la línea del 16 % y a la línea del 84 % y el tamaño medio (Chen, 1999).

$$CV = \frac{\textit{Abertura para el 16 \%} - \textit{Abertura para el 84 \%}}{2 * AM} * 100$$

### 3. DISEÑO METODOLÓGICO

#### 3.1. Variables

A continuación, se listan las variables dependientes e independientes.

Tabla I. Descripción de las variables cuantificables

No.	Variable	Unidad	Tipo de Variable		
			Independiente	Dependiente	Fija
1	Tipo de templa	Adimensional	X		
2	Coeficiente de variación	Adimensional		X	
3	Tamaño medio de cristales	$\mu\text{m}$		X	
4	Azúcar retenido	%		X	
5	Masa de muestra	G			X

Fuente: elaboración propia, realizado en Microsoft Word.

#### 3.2. Delimitación de campo de estudio

- Campo de estudio: Refinadora de azúcar en Guatemala.
- Área de investigación: Enfriadora de cascada de tambor rotatorio.
- Línea de investigación: Granulometría.
- Localización: El estudio se realizó en un ingenio de Escuintla, Guatemala.
- Objeto de estudio: El desarrollo del estudio se centrará en la evaluación de la influencia de una enfriadora de cascada de tambor rotatorio en la calidad granulométrica del azúcar refinado.

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

- Investigador: Carlos Enrique Martínez García
- Asesor: Ing. Qco. Byron de Jesús López Maldonado

### **3.4. Recursos materiales disponibles**

A continuación, se presentan los recursos materiales empleados durante la fase experimental.

#### **3.4.1. Materia prima**

- Azúcar Refinado A, Azúcar Refinado B y Azúcar Refinado C.

#### **3.4.2. Instrumentos de medición**

- Balanza digital.

#### **3.4.3. Equipo Auxiliar**

- Agitador Ro-Tap.
- Tándem de tamices de diferentes aberturas tipo WS Tyler.
- Toma muestras.
- Computadora.
- Herramienta de cálculo de granulometría.
- Herramienta de análisis de datos de InfoStat.
- Herramienta de gráficos de Excel.

#### **3.4.4. Cristalería**

- Beakers 250, marca Pirex.
- Cuchara para azúcar.

### **3.5. Técnica cuantitativa**

Esta investigación fue de carácter cuantitativo, experimental y comparativo a escala laboratorio. Se analizaron los valores generados por la metodología experimental. El proceso de obtención de la información fue a por medio de un análisis de granulometría, en el cual buscó evaluar el proceso de enfriamiento de azúcar refinado A, B y C. Se procedió a la recolección de estas muestras y con la ayuda de un vibrador tipo RO-TAP, se realizó el análisis de granulometría. Posteriormente, calculó el tamaño medio de los cristales, coeficiente de variación y retención de cristales que pasan la malla 115, y se realizó un análisis estadístico de comparación de medias apareadas para evaluar si existe diferencia significativa al aplicar el enfriamiento.

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

A continuación, se detalla el procedimiento realizado durante la fase experimental.

##### **3.5.1.1. Ubicación y recolección de muestras**

La recolección de datos se realizó en el laboratorio del Ingenio, a partir de muestras tomadas en el proceso de enfriamiento de azúcar refino A, B o C.

### **3.5.1.2. Proceso de recolección de muestras**

Se recolectó los siguientes datos generados por el software de análisis de granulometría: retención de azúcar que pasa la malla 115, tamaño medio de los cristales a 16 %, 50 % 84 %, y coeficiente de variación de 60 muestras tomadas antes y después de aplicar el tratamiento de enfriado por medio de la enfriadora de cascada de tambor rotatorio, en la zafra 2019-2020 del Ingenio.

### **3.5.1.3. Identificación y control de muestras**

Las muestras se identificaron por el tipo de material, fecha y hora de muestreo. Asimismo, se tomó en cuenta el tipo de masa de muestra a analizar.

## **3.5.2. Análisis de granulometría**

Este análisis se realizó mediante la metodología interna del Ingenio la cual fue la siguiente:

- Se limpió y preparó el tambor de tamices.
- Se midió la masa de los tamices tipo WS Tyler No.16, 20, 30, 40, 50, 60, 80, 115 y bandeja recolectora de finos.
- Se acomodaron los tamices por tamaño de malla descendente.
- Se pesó 100 gramos de una muestra de azúcar.
- Se agregó la muestra al tambor de tamices.
- Se tapó y colocó en el vibrador Ro-Tap
- Se agitó por 10 minutos.
- Se midió la masa de los tamices con el azúcar retenido.
- Se introdujo los valores al sistema de cálculo.

### 3.6. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información

Los datos tabulados son referentes para 60 muestras que fueron analizadas para la comparación al momento de realizar el tratamiento de enfriado en la enfriadora de cascada de tambor rotatorio.

Tabla II. **Datos del tamaño de los cristales analizados en cada muestra tomados antes de aplicar el tratamiento de enfriado en tachos de refinería**

No. Muestra	Fecha	Hora de muestreo	Tipo de masa	Tamaño de los cristales ( $\mu\text{m}$ )		
				16 %	50 %	80 %
1	18/02/2020	09:12	B	820.65	628.78	387.89
2	18/02/2020	11:10	A	958.05	658.91	399.62
3	19/02/2020	09:30	C	997.89	718.39	467.59
4	19/02/2020	11:20	A	820.05	624.19	399.39
5	20/02/2020	09:37	B	826.07	631.92	386.98
6	20/02/2020	11:00	C	838.25	661.46	424.88
7	24/02/2020	08:12	C	859.63	593.14	355.64
8	24/02/2020	14:25	A	785.41	555.81	335.75
9	25/02/2020	14:28	A	780.72	553.75	352.97
10	26/02/2020	08:42	A	848.45	586.87	349.99
11	26/02/2020	14:50	C	1068.55	769.35	478.51
12	27/02/2020	09:25	B	949.16	692.54	449.51
13	27/02/2020	14:40	B	758.45	524.95	332.52
14	28/02/2020	08:30	A	879.04	622.97	364.72
15	03/03/2020	08:25	A	765.7	540.37	351.46
16	4/03/2020	09:10	B	830.23	647.04	429.39
17	4/03/2020	14:05	B	817.85	621.59	400.96

Continuación tabla II.

No. Muestra	Fecha	Hora de muestreo	Tipo de masa	Tamaño de los cristales ( $\mu\text{m}$ )		
				16 %	50 %	80 %
18	5/03/2020	09:10	A	909.27	671.6	424.17
19	5/03/2020	09:50	C	836.03	643.77	391.57
20	6/03/2020	09:35	A	1,001.96	719.58	464.02
21	7/03/2020	07:45	B	905.24	658.51	402.48
22	11/03/2020	07:50	A	781.35	552.82	345.47
23	13/03/2020	08:55	B	971.86	704.24	453.48
24	13/03/2020	14:20	A	786.08	563.62	351.62
25	16/03/2020	09:00	A	814.68	609.42	403.03
26	16/03/2020	14:50	B	895.92	647.94	391.41
27	17/03/2020	07:50	A	834.13	645.49	430.07
28	17/03/2020	14:50	A	827.06	622.06	370.22
29	18/03/2020	08:15	B	846.87	659.97	410.38
30	19/03/2020	09:15	A	793.73	569.66	363.71

Fuente: elaboración propia, realizado en Microsoft Word.

Tabla III. **Datos del coeficiente de variación y cristales que pasan la malla 115 antes de aplicar el tratamiento de enfriado en tachos de refinería**

No. Muestra	Fecha	Hora de muestreo	Tipo de masa	Cristales que pasan la malla 115 (g)	Coeficiente de variación
1	18/02/2020	09:12	B	0.9	34.41
2	18/02/2020	11:10	A	0.6	42.38
3	19/02/2020	09:30	C	0.3	36.91
4	19/02/2020	11:20	A	1	33.7
5	20/02/2020	09:37	B	0.75	34.74

Continuación tabla III.

<b>No. Muestra</b>	<b>Fecha</b>	<b>Hora de muestreo</b>	<b>Tipo de masa</b>	<b>Cristales que pasan la malla 115 (g)</b>	<b>Coefficiente de variación</b>
6	20/02/2020	11:00	C	0.46	31.25
7	24/02/2020	08:12	C	1.2	42.48
8	24/02/2020	14:25	A	1.23	40.45
9	25/02/2020	14:28	A	1.6	38.62
10	26/02/2020	08:42	A	1.21	42.47
11	26/02/2020	14:50	C	0.61	38.35
12	27/02/2020	09:25	B	0.56	36.07
13	27/02/2020	14:40	B	1.52	40.57
14	28/02/2020	08:30	A	1.71	41.28
15	03/03/2020	08:25	A	1.29	38.33
16	4/03/2020	09:10	B	0.85	30.97
17	4/03/2020	14:05	B	0.86	33.53
18	5/03/2020	09:10	A	0.81	36.12
19	5/03/2020	09:50	C	1.1	34.52
20	6/03/2020	09:35	A	0.98	37.38
21	7/03/2020	07:45	B	0.87	38.17
22	11/03/2020	07:50	A	1.48	39.42
23	13/03/2020	08:55	B	0.74	36.8
24	13/03/2020	14:20	A	1.55	38.52
25	16/03/2020	09:00	A	1.03	33.77
26	16/03/2020	14:50	B	1.34	38.93
27	17/03/2020	07:50	A	0.95	31.3
28	17/03/2020	14:50	A	1.54	36.72
29	18/03/2020	08:15	B	0.89	33.07
30	19/03/2020	09:15	A	1.46	37.74

Fuente: elaboración propia, realizado en Microsoft Word.

Tabla IV. **Datos del tamaño de los cristales analizados en cada muestra después de aplicar el tratamiento de enfriado en tachos de refinería**

No. Muestra	Fecha	Hora de muestreo	Tipo de masa	Tamaño de los cristales ( $\mu\text{m}$ )		
				16 %	50 %	80 %
1	18/02/2020	09:12	B	811.72	608.37	360.19
2	18/02/2020	11:10	A	924.62	618.81	351.32
3	19/02/2020	09:30	C	959.96	667.87	368.48
4	19/02/2020	11:20	A	808.33	600	358.1
5	20/02/2020	09:37	B	816.12	604.36	352.23
6	20/02/2020	11:00	C	824.69	643.53	401.88
7	24/02/2020	08:12	C	925	631.4	371.56
8	24/02/2020	14:25	A	786.58	558.49	334.73
9	25/02/2020	14:28	A	761.56	523.31	317.86
10	26/02/2020	08:42	A	869.85	593.8	340.63
11	26/02/2020	14:50	C	1074.39	777.94	485.09
12	27/02/2020	09:25	B	909.21	660.97	387.62
13	27/02/2020	14:40	B	730.37	488.3	290.92
14	28/02/2020	08:30	A	905.69	641.32	375
15	03/03/2020	08:25	A	762.98	534.96	339.08
16	4/03/2020	09:10	B	806.58	598.29	362.36
17	4/03/2020	14:05	B	803.23	587.38	360.17
18	5/03/2020	09:10	A	918.07	671.7	407.42
19	5/03/2020	09:50	C	821.65	609.31	355.49
20	6/03/2020	09:35	A	1000.62	721.4	466.21
21	7/03/2020	07:45	B	876.78	640.48	371.69
22	11/03/2020	07:50	A	797.79	581.02	359.92
23	13/03/2020	08:55	B	955.76	688.56	424.87
24	13/03/2020	14:20	A	783.43	561.05	350.31
25	16/03/2020	09:00	A	810.02	599.94	390.49
26	16/03/2020	14:50	B	894.93	645.24	381.79
27	17/03/2020	07:50	A	835.03	647.7	429.49
28	17/03/2020	14:50	A	820.58	603.64	353.49
29	18/03/2020	08:15	B	841.77	653.97	406.56

Continuación tabla IV.

No. Muestra	Fecha	Hora de muestreo	Tipo de masa	Tamaño de los cristales ( $\mu\text{m}$ )		
				16 %	50 %	80 %
30	19/03/2020	09:15	A	790.03	560.25	345.96

Fuente: elaboración propia, realizado en Microsoft Word.

Tabla V. **Datos del coeficiente de variación y cristales que pasan la malla 115 antes de aplicar el tratamiento de enfriado en tachos de refinería**

No. Muestra	Fecha	Hora de muestreo	Tipo de masa	Cristales que pasan la malla 115 (g)	Coeficiente de variación
1	18/02/2020	09:12	B	1.9	37.11
2	18/02/2020	11:10	A	1.8	46.32
3	19/02/2020	09:30	C	2.41	44.28
4	19/02/2020	11:20	A	1.5	37.52
5	20/02/2020	09:37	B	1.94	38.38
6	20/02/2020	11:00	C	1.02	32.85
7	24/02/2020	08:12	C	1.67	43.83
8	24/02/2020	14:25	A	1.5	40.45
9	25/02/2020	14:28	A	3.36	42.38
10	26/02/2020	08:42	A	2.06	44.56
11	26/02/2020	14:50	C	0.85	37.88
12	27/02/2020	09:25	B	1.93	39.46
13	27/02/2020	14:40	B	4.29	45
14	28/02/2020	08:30	A	1.81	41.37
15	03/03/2020	08:25	A	2.35	39.62
16	4/03/2020	09:10	B	2.17	37.12

Continuación tabla V.

<b>No. Muestra</b>	<b>Fecha</b>	<b>Hora de muestreo</b>	<b>Tipo de masa</b>	<b>Cristales que pasan la malla 115 (g)</b>	<b>Coefficiente de variación</b>
17	4/03/2020	14:05	B	1.95	37.71
18	5/03/2020	09:10	A	1.74	38.01
19	5/03/2020	09:50	C	1.11	38.25
20	6/03/2020	09:35	A	1.12	37.04
21	7/03/2020	07:45	B	1.85	39.43
22	11/03/2020	07:50	A	1.88	37.68
23	13/03/2020	08:55	B	1.62	38.55
24	13/03/2020	14:20	A	1.76	38.6
25	16/03/2020	09:00	A	1.34	34.96
26	16/03/2020	14:50	B	1.64	39.76
27	17/03/2020	07:50	A	1.09	31.31
28	17/03/2020	14:50	A	1.61	38.69
29	18/03/2020	08:15	B	1.45	33.27
30	19/03/2020	09:15	A	2.21	39.63

Fuente: elaboración propia, realizado en Microsoft Word.

### **3.7. Análisis estadístico**

A continuación, se presenta el análisis estadístico de los resultados experimentales obtenidos.

#### **3.7.1. Comprobación de medias apareadas**

Para realizar la prueba de hipótesis de comparación de media apareadas se utilizó la herramienta de análisis de datos de InfoStat 2020. Se compararon las medias del tamaño promedio, coeficiente de variación y retención en la

bandeja final de los cristales de sacarosa antes de realizar el tratamiento de enfriado en la enfriadora de tambor rotatorio y después de realizar el tratamiento. Se obtuvo el valor estadístico P (bilateral) y se comparó con el valor crítico de P, con un nivel de significancia del 5 %.

**Tabla VI. Comparación de medias apareadas para los valores de tamaño promedio, coeficiente de variación y retención en la bandeja final de los cristales de sacarosa antes y después de realizar el tratamiento.**

<b>Parámetro</b>	<b>Media estado inicial</b>	<b>Media estado final</b>	<b>Estadístico P (bilateral)</b>	<b>¿Se rechaza H<sub>0</sub>?</b>
<b>Coeficiente de variación</b>	36.97	39.03	< 0.0001	Sí
<b>Tamaño promedio (µm)</b>	630.02	617.45	0.0033	Sí
<b>Retención en la bandeja final (g)</b>	1.05	1.83	< 0.0001	Sí

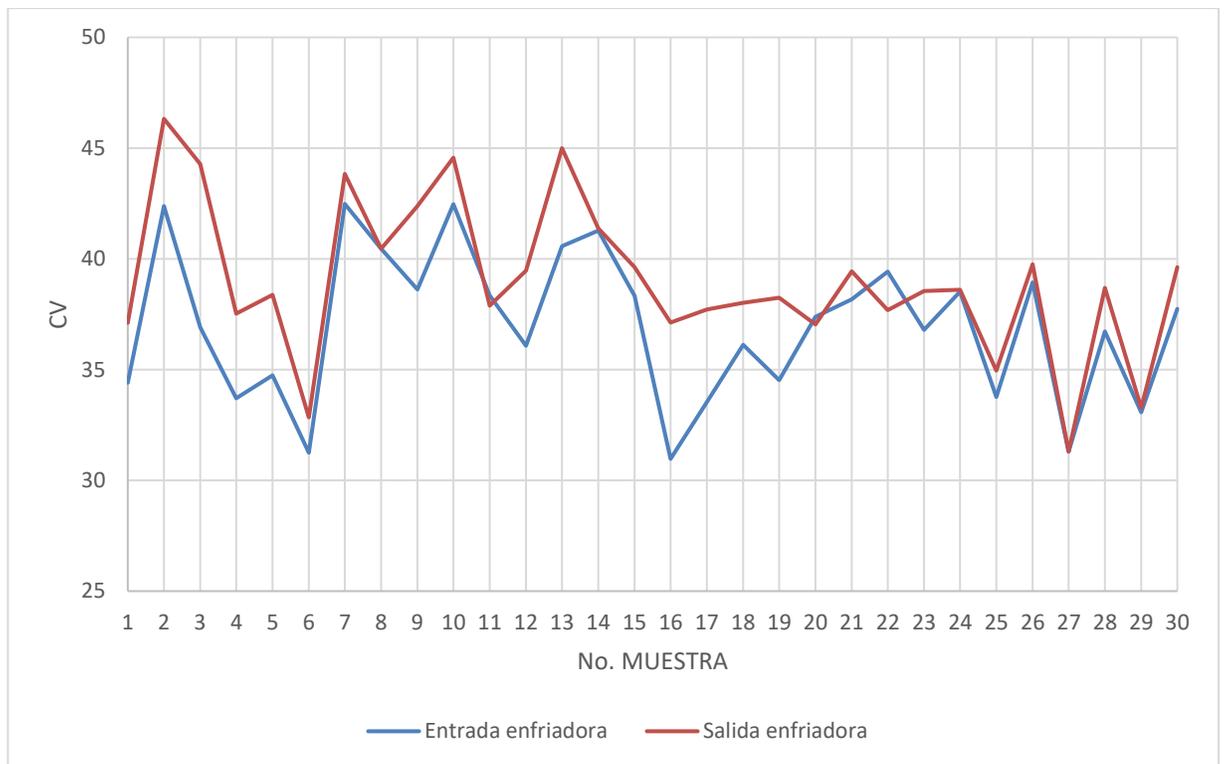
Fuente: elaboración propia, realizado en Microsoft Word.

Según la tabla VI, realizada la prueba de T para medias apareadas, el valor de P (bilateral) es inferior a 0.05 para todos los casos, por lo que se rechaza la hipótesis nula en todos los casos, es decir, los valores del coeficiente de variación, tamaño promedio y retención en la bandeja final de cristales de sacarosa antes de aplicar el tratamiento de enfriado en la enfriadora de tambor rotatorio son diferentes a los valores después de aplicar el tratamiento.



## 4. RESULTADOS

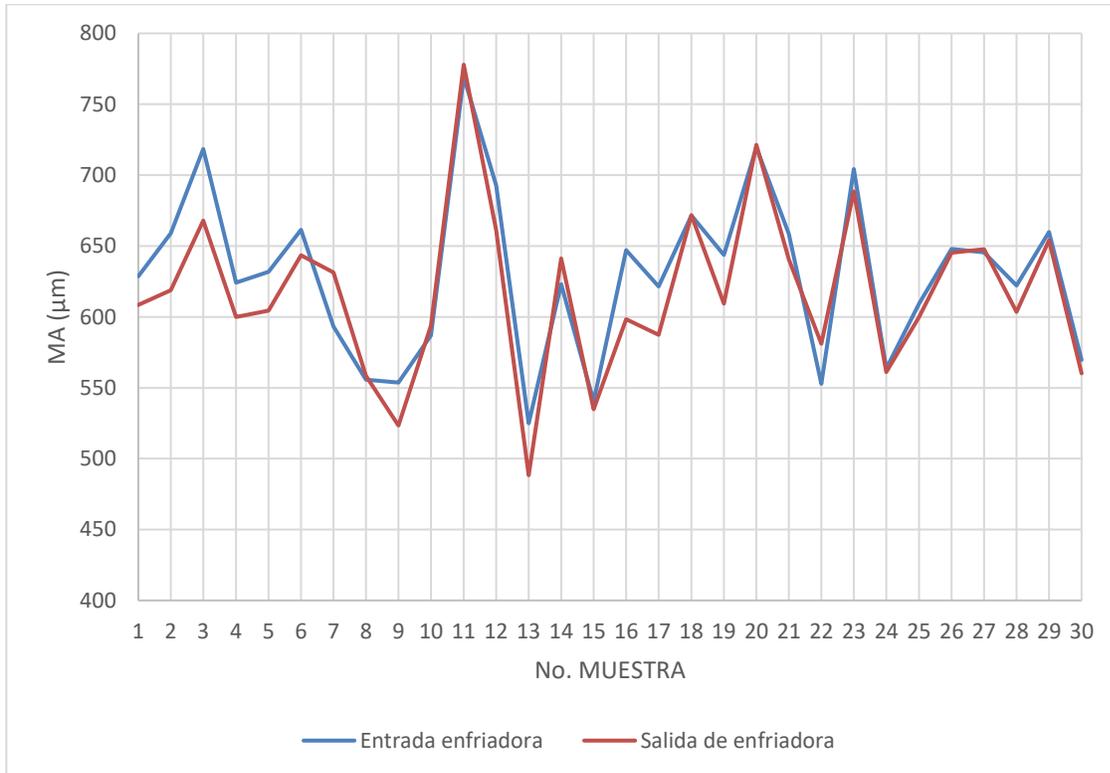
Figura 12. **Coefficiente de variación (CV) para la entrada y salida de la enfriadora de cascada de tambor rotatorio**



Fuente: elaboración propia, realizado en Microsoft Excel.

Observaciones: Se presentó un incremento significativo en el coeficiente de variación por la operación de la enfriadora de cascada de tambor rotatorio.

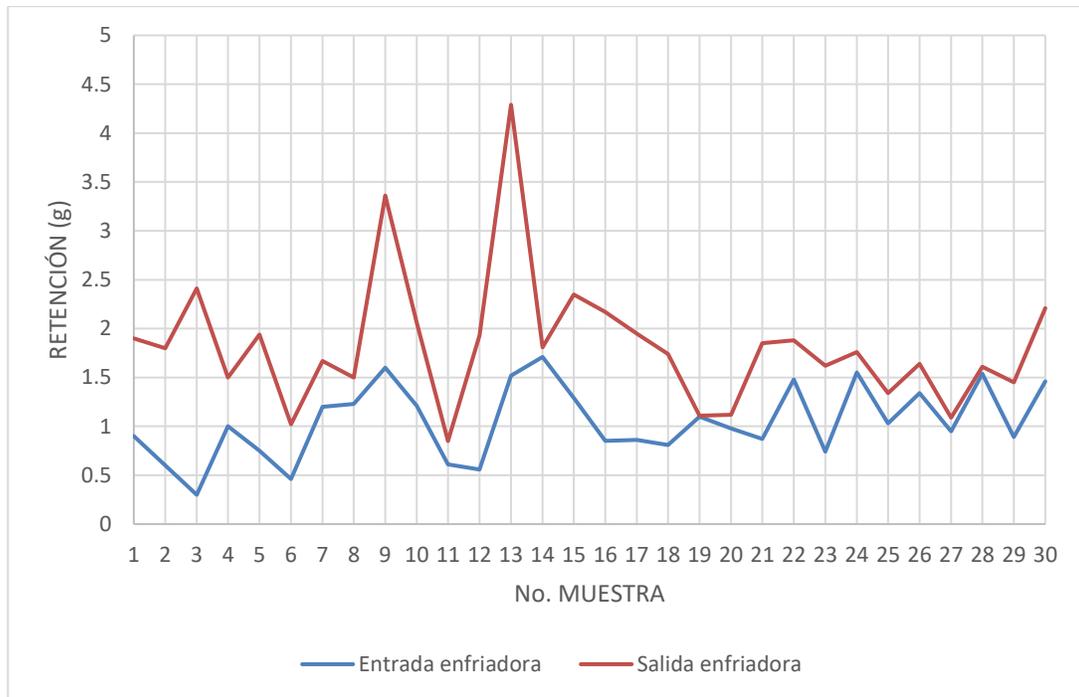
Figura 13. **Tamaño medio (MA) de los cristales de sacarosa para la entrada y salida de la enfriadora de cascada de tambor rotatorio**



Fuente: elaboración propia, realizado en Microsoft Excel.

Observaciones: Se presentó una disminución significativa del tamaño medio de los cristales de sacarosa por la operación de la enfriadora de cascada de tambor rotatorio.

Figura 14. **Retención de cristales finos de sacarosa que pasan la malla 115 para la entrada y salida de la enfriadora de cascada de tambor rotatorio**



Fuente: elaboración propia, realizado en Microsoft Excel.

Observaciones: Se presentó un aumento significativo de la retención de los cristales de sacarosa que pasan la malla 115 por la operación de la enfriadora de cascada de tambor rotatorio.



## 5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El análisis de la operación de la enfriadora de cascada de tambor rotatorio se realizó mediante un equipo de tambor de tamices proporcionado por el Ingenio azucarero el cual se muestra en el apéndice 1.

En la figura 12 se presentan los resultados del coeficiente de variación para la entrada y la salida de la enfriadora de cascada de tambor rotatorio, se observó un incremento significativo en el coeficiente de variación en la salida de la enfriadora de cascada de tambor rotatorio.

Las desigualdades presentadas podrían atribuirse al daño que pueden generar a los cristales de sacarosa debido al movimiento de agitación rotativa y las repetidas caídas que sufren los cristales de sacarosa durante la operación de enfriamiento, asimismo, a la fractura y fragmentación de cristales que aumenta el coeficiente de variación. La fractura y fragmentación, cambio en el tamaño y forma de los cristales hacen que los cristales de azúcar sean más reactivos al vapor de agua, formando aterronamiento de los cristales y aumentando el coeficiente de variación en el proceso de enfriamiento de los cristales de sacarosa (Rogé & Mathlouthi, 2003). De igual manera, valores altos del coeficiente de variación pueden tener como origen el uso de semillas con distribución de gran tamaño, nucleación espontánea y cambios rápidos en vacío o temperatura durante la ebullición (Mathlouthi, 2014).

En la figura 13 se presentan los resultados del tamaño medio de los cristales de sacarosa para la entrada y salida de la enfriadora de cascada de tambor rotatorio, se observó una disminución significativa del tamaño medio de

los cristales de sacarosa por la operación de la enfriadora de cascada de tambor rotatorio.

Las desigualdades presentadas podrían atribuirse al proceso de cristalización en los tachos de refinería debido a la formación de cristales aglomerados y conglomerados (Fernández et al., 2011). Asimismo, se puede atribuir a la fractura y fragmentación de los cristales en la operación de enfriamiento y presencia de humedad y finos en el proceso que puede aumentar la posibilidad de generar conglomerados durante el proceso de enfriamiento (Rogé & Mathlouthi, 2003). De esta manera, la diferencia del tamaño medio de los cristales podría ser por impurezas presentes en la sacarosa, generando formas irregulares tipo agujas; también al uso de semillas con distribución variada de tamaño e irregularidades como la nucleación espontánea y variación en el proceso evaporativo.

En la figura 14 se presentan los resultados de la retención de cristales finos de sacarosa que pasan la malla 115 para la entrada y la salida de la enfriadora de cascada de tambor rotatorio en la cual se observó un aumento significativo de la retención de los cristales de sacarosa que pasan la malla 115 por la operación de la enfriadora de cascada de tambor rotatorio.

Las desigualdades presentadas podrían atribuirse al daño que puede generar la operación de la enfriadora de cascada de tambor rotatorio debido al movimiento de agitación rotativa y las repetidas caídas que sufren los cristales de sacarosa durante la etapa de enfriamiento (CENGICAÑA, 2014). Asimismo, la formación de partículas finas puede darse por diferentes tipos de rotura, dependiendo de la fuerza aplicada y su dirección como el desgaste, abrasión, fractura, fragmentación y astillado (Verkoeijen et al., 2002). Debido al desgaste o abrasión, la forma de los cristales se vuelve más redonda, durante el astillado,

los cristales se rompen y se vuelven más ásperos. De esta manera, el desgaste que sufren los cristales por raspaduras o abrasión a las superficies de la enfriadora de cascada de tambor rotatorio como mallas metálicas, como entre los mismos cristales de sacarosa, causa pérdidas del brillo de los cristales de sacarosa y formación de cierta cantidad de finos (Rein, 2012).

Con base en el análisis estadístico se puede afirmar de manera global que la operación de la enfriadora de cascada de tambor rotatorio, con un nivel de significancia del 95 %, que los valores del coeficiente de variación, tamaño medio de los cristales de sacarosa y retención de finos en la bandeja final del tambor de tamices antes de aplicar el tratamiento de enfriado en la enfriadora de cascada de tambor rotatorio son diferentes a los valores después de aplicar el tratamiento.

Finalmente, se realiza la observación que en el presente experimento se considera que la operación de enfriamiento por medio de la enfriadora de cascada de tambor rotatorio afecta significativamente en la calidad granulométrica del azúcar refinado y podría explicar las variaciones en el coeficiente de variación, tamaño medio de los cristales de sacarosa y generación de finos durante el proceso de fabricación de azúcar refinada y podría servir como referencia para mitigar pérdidas económicas debido a rechazos y gastos por reprocesos, venta a menor precio en el mercado local o pérdida de sacarosa al ambiente. Asimismo, podría contribuir a la mitigación de los riesgos potenciales a la salud de los colaboradores como la explosividad de los polvos finos de sacarosa y diferentes problemas relacionados a la salud como enfermedades en las vías respiratorias del tipo traqueítis o bronquitis, asma, rinitis y alveolitis que puede evolucionar a problemas pulmonares severos (Comisión Europea, Fiscalidad y Unión Aduanera, 2012).



## CONCLUSIONES

1. Se pudo determinar a través de un análisis comparativo de la granulometría de azúcar en la entrada y la salida de la enfriadora de tambor rotatorio que el coeficiente de variación aumentó significativamente por el paso en este equipo.
2. Se observó a partir del paso del azúcar en la enfriadora de tambor rotatorio que el tamaño medio del grano disminuyó significativamente a la salida de esta, por el desgaste que sufren los cristales por el paso en el equipo y disminuyendo así el tamaño medio.
3. Se determinó que la cantidad retenida de polvillo en la salida de la enfriadora de tambor rotatorio fue mucho mayor a la que se retuvo en la entrada, esto indica que los cristales de sacarosa se degradan por el paso en el equipo de enfriamiento.



## RECOMENDACIONES

1. Optimizar el sistema de enfriamiento de manera de poder sustituir el equipo actual por un equipo de enfriamiento de lecho fluidizado para evitar disminuir la calidad de los cristales de sacarosa en este proceso.
2. Analizar la variación de las características granulométricas del azúcar de refino en otros puntos de muestreo como el área de envasado y el paso por los tornillos sin fin que se usan como conductores de los cristales de azúcar.
3. Recolectar y reutilizar el polvillo de azúcar por un sistema en el cual permita usar el polvillo para enriquecer el licor para realizar cristalizaciones en los tachos discontinuos de refinería.
4. Aplicar otras técnicas para determinar la pérdida de azúcar durante el proceso de fabricación y almacenaje y establecer un método para la recolección de los cristales finos de azúcar y generar una proyección económica que permita analizar si es factible venderlos como azúcar *glass* o alguna otra presentación de azúcar.



## REFERENCIAS

1. Arizabaleta, J. (2014). *Análisis comparativo de la calidad del azúcar obtenida del sistema de tachos automáticos y manuales en el Ingenio del Cauca, S.A.* Universidad de San Buenaventura Cali.
2. Buenaventura, C. (1989). *Manual de laboratorio para la industria azucarera.* Graficali de Occidente.
3. CENGICAÑA. (2014). *El cultivo de la caña de azúcar en Guatemala.* Editorial Artemis Edinter.
4. Chen, J. (1991). *Manual del azúcar de caña* (11a ed.). Editorial Limusa.
5. Comisión Europea, Fiscalidad y Unión Aduanera. (2012). *Polvos y nanopartículas Salud y seguridad.* Recuperado de [https://ec.europa.eu/taxation\\_customs/dds2/SAMANCTA/ES/Safety/Dust\\_ES.htm](https://ec.europa.eu/taxation_customs/dds2/SAMANCTA/ES/Safety/Dust_ES.htm).
6. Domínguez, G. (2013). *Normalización del tamaño del cristal de azúcar en el proceso azucarero a través del desarrollo sustentable aplicado al balance energético.* Centro de Investigación en Ciencia y Tecnología Avanzada.

7. Durán, C. (2014). *Desarrollo de una Técnica Lagrangiana para el Dimensionamiento y Análisis Paramétrico de Secadores Rotativos*. Escuela Superior Politécnica del Litoral.
8. EcuRed. (2013). *Caña de azúcar*. Recuperado de [https://www.ecured.cu/Ca%C3%B1a\\_de\\_az%C3%BAcar](https://www.ecured.cu/Ca%C3%B1a_de_az%C3%BAcar).
9. Fernández, Hernández, y Viera, (2011). *Modelos para el cálculo de la constante de velocidad de cristalización del azúcar comercial en tachos. (PARTE I)*. Tecnología Química. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=445543772002>.
10. Fuentes, S. (2006). *Optimización del proceso de fabricación de azúcar blanca para mejorar la calidad, en el Ingenio Santa Teresa, S.A.* Universidad de San Carlos de Guatemala.
11. Garza, J., Morales. B., & González, B. (2013). *Análisis estadístico multivariante, un enfoque teórico y práctico*. McGraw-Hill Interamericana.
12. Geankoplis, C. (1998). *Procesos de transporte y operaciones unitarias*. Editorial Continental.
13. Hugot, E. (1984). *Manual Para Ingenieros Azucareros* (1a. ed.). Editorial Continental.
14. ISTAS-CCOO. (2019). *Polvo en suspensión: ¿Más peligroso de lo que parece?* Recuperado de: <https://istas.net/sites/default/files/2019->

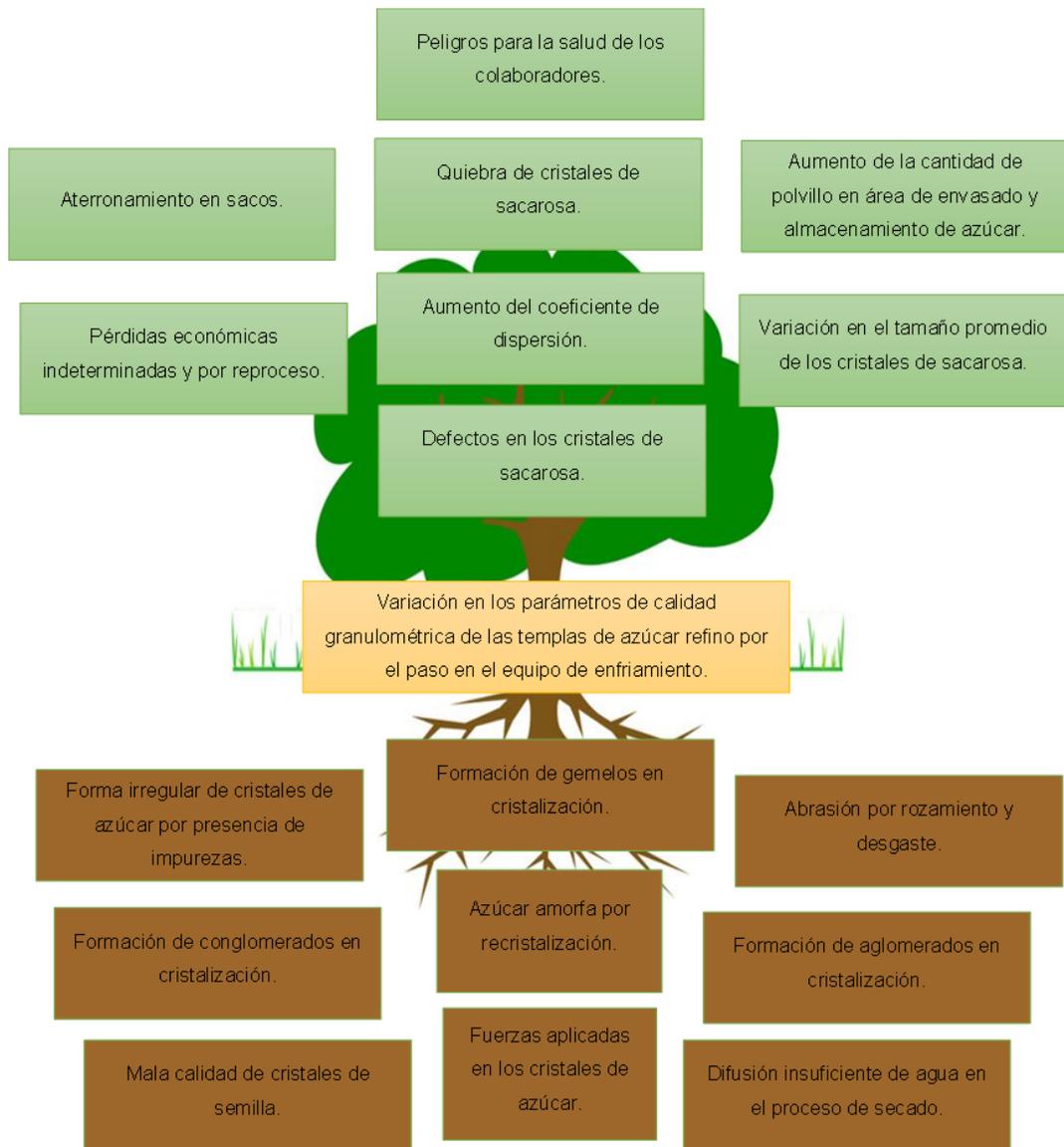
11/Polvo\_suspensi%C3%B3n\_Informe\_situacion\_industria\_papel\_2019.pdf.

15. Larrahondo, J. (1995). *Calidad de la caña de azúcar*. CENICAÑA.
16. Páez, C. (2013). *Determinación de las condiciones óptimas para la producción de azúcar turbinado en los parámetros color y tamaño de grano en la empresa Ingenio Risaralda, S.A.* Universidad Tecnológica de Pereira.
17. Perry, JOHN H. (2001). *Manual Del Ingeniero Químico. Volumen III* (7ma ed.). McGraw-Hill.
18. Rogé, Mathlouthi & Hinkova. (2014). *Quality of Sucrose Crystals and Storage Stability of White Sugar*. Laboratoire de Chimie Physique Industrielle.
19. Rogé & Mathlouthi. (2003). *Caking of white crystalline sugar*. International Sugar Journal.
20. Richard, J. (2012). *Probabilidad y estadística para ingenieros*. Pearson Educación.
21. Rubnik, Kadlec, Pour & Hinkova. (2001). *Computer image analysis of sugar crystal - powerful tool for evaluation and control of crystallization process*. 8th Symposium of AVH Association.
22. Spencer, Guilford & George MEADE. (1948). *Cane Sugar Hand Book. 9a edición*. Editorial John Wiley and sons, inc.

23. Sweis, F. K. (2020). *Dust Explosions in the Food Industries*. International Journal of Science and Engineering Investigations (IJSEI). Recuperado de: <http://www.ijsei.com/papers/ijsei-99620-13.pdf>.
24. Vaccari & Mantovani. (1995). *Sucrose crystallization in "Sucrose properties and applications"*. Blackie Academic & Professional.
25. Verkoeyen, Meesters, Vercoulen y Scarlett. (2002). *Determining granule strength as a function of moisture content*. Powder Technology. Recuperado de: [https://doi.org/10.1016/S0032-5910\(02\)00019-0](https://doi.org/10.1016/S0032-5910(02)00019-0).

# APÉNDICES

## Apéndice 1. Árbol de problemas



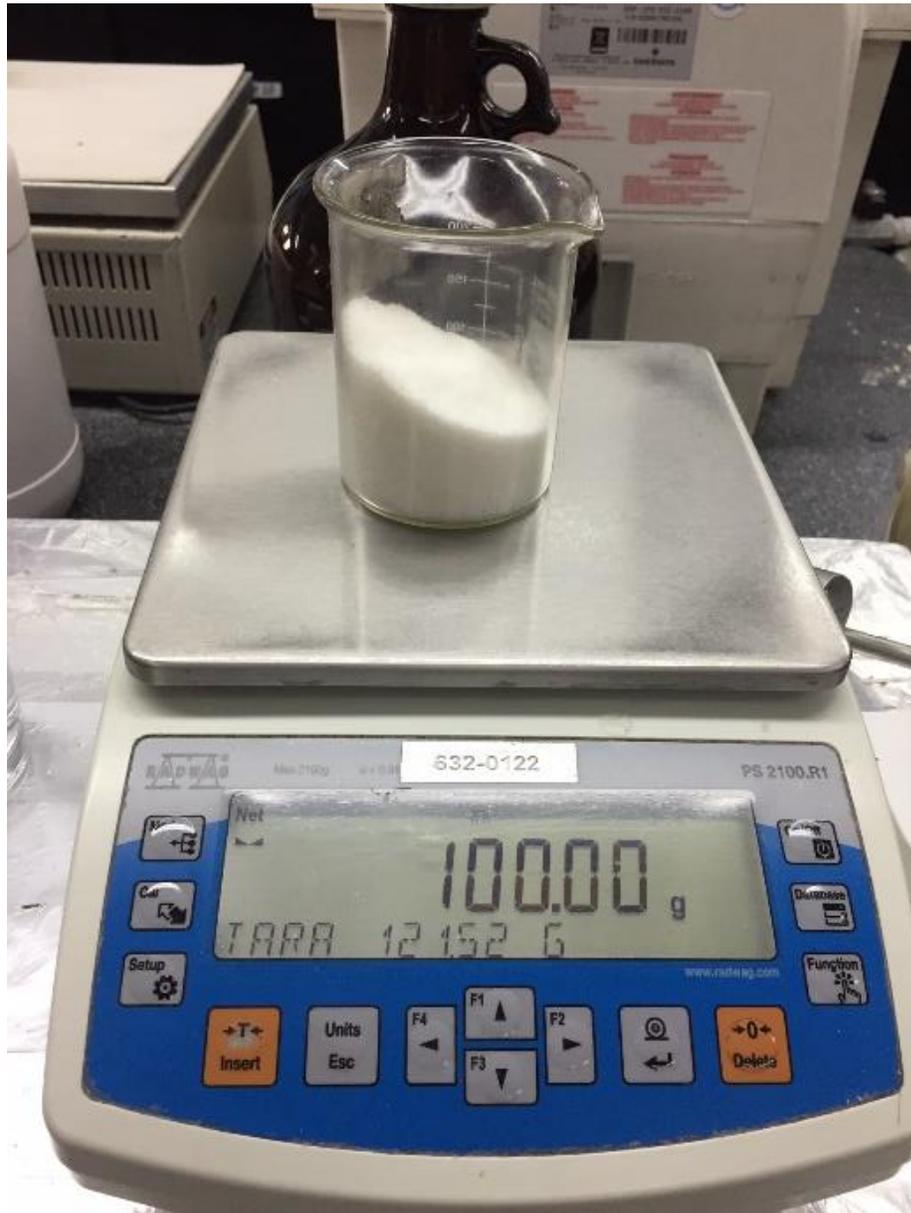
Fuente: elaboración propia, realizado en Microsoft Word.

Apéndice 3. **Equipo vibratorio marca Ro-Tap.**



Fuente: [Fotografía de Carlos Martínez]. (Finca Cerritos, Escuintla, 2020). Colección particular.  
Guatemala.

Apéndice 4. **Medición de la muestra de azúcar para el análisis de granulometría**



Fuente: [Fotografía de Carlos Martínez]. (Finca Cerritos, Escuintla, 2020). Colección particular. Guatemala.

Apéndice 5. **Fotografía de cristales conglomerados en la salida de la enfriadora.**



Fuente: [Fotografía de Carlos Martínez]. (Finca Cerritos, Escuintla, 2020). Colección particular. Guatemala.

Apéndice 6. **Cristal aglomerado en la salida de la enfriadora.**



Fuente: [Fotografía de Carlos Martínez]. (Finca Cerritos, Escuintla, 2020). Colección particular.  
Guatemala.

Apéndice 7. **Tamiz No.16 y cristales retenidos en la malla.**



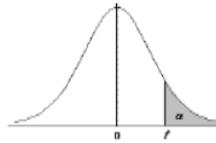
Fuente: [Fotografía de Carlos Martínez]. (Finca Cerritos, Escuintla, 2020). Colección particular.  
Guatemala.

# ANEXO

## Anexo 1. Tabla de T de Student

Tabla de la t de Student.

Contiene los valores  $t$  tales que  $p[T > t] = \alpha$ ,  
donde  $n$  son los grados de libertad.



$n \setminus \alpha$	0,30	0,25	0,20	0,10	0,05	0,025	0,01	0,005	0,0025	0,001	0,0005
1	0,7285	1,0000	1,3764	3,0777	6,3137	12,7062	31,8210	63,6559	127,3213	318,3088	636,6192
2	0,8172	0,8165	1,0607	1,8858	2,9200	4,3027	6,9645	9,9250	14,0890	22,3271	31,5991
3	0,8644	0,7849	0,9785	1,6377	2,3534	3,1824	4,5407	5,8408	7,4533	10,2145	12,9240
4	0,8886	0,7407	0,9410	1,5332	2,1318	2,7765	3,7489	4,6041	5,5976	7,1732	8,6103
5	0,8994	0,7267	0,9195	1,4759	2,0150	2,5706	3,3649	4,0321	4,7733	5,8934	6,8688
6	0,9034	0,7176	0,9057	1,4398	1,9432	2,4469	3,1427	3,7074	4,3168	5,2076	5,9588
7	0,9091	0,7111	0,8980	1,4149	1,8946	2,3846	2,9979	3,4995	4,0293	4,7853	5,4079
8	0,9145	0,7064	0,8889	1,3968	1,8595	2,3380	2,8965	3,3554	3,8325	4,5008	5,0413
9	0,9195	0,7027	0,8834	1,3830	1,8331	2,2822	2,8214	3,2498	3,6897	4,2968	4,7809
10	0,9241	0,6988	0,8791	1,3722	1,8125	2,2281	2,7638	3,1693	3,5914	4,1437	4,5899
11	0,9284	0,6974	0,8755	1,3634	1,7959	2,2010	2,7181	3,1058	3,4968	4,0247	4,4370
12	0,9325	0,6955	0,8728	1,3562	1,7823	2,1788	2,6810	3,0545	3,4284	3,9296	4,3178
13	0,9364	0,6938	0,8702	1,3502	1,7709	2,1604	2,6503	3,0123	3,3725	3,8520	4,2208
14	0,9399	0,6924	0,8681	1,3450	1,7613	2,1448	2,6245	2,9788	3,3257	3,7874	4,1405
15	0,9432	0,6912	0,8662	1,3408	1,7531	2,1315	2,6025	2,9467	3,2860	3,7328	4,0728
16	0,9463	0,6901	0,8647	1,3368	1,7459	2,1199	2,5835	2,9208	3,2520	3,6862	4,0150
17	0,9492	0,6892	0,8633	1,3334	1,7396	2,1098	2,5669	2,8982	3,2224	3,6458	3,9651
18	0,9519	0,6884	0,8620	1,3304	1,7341	2,1009	2,5524	2,8784	3,1968	3,6105	3,9216
19	0,9544	0,6876	0,8610	1,3277	1,7291	2,0930	2,5395	2,8609	3,1737	3,5794	3,8834
20	0,9567	0,6870	0,8600	1,3253	1,7247	2,0860	2,5280	2,8453	3,1534	3,5518	3,8495
21	0,9588	0,6864	0,8591	1,3232	1,7207	2,0796	2,5176	2,8314	3,1352	3,5272	3,8193
22	0,9607	0,6858	0,8583	1,3212	1,7171	2,0739	2,5083	2,8188	3,1188	3,5050	3,7921
23	0,9624	0,6853	0,8575	1,3195	1,7139	2,0687	2,4999	2,8073	3,1040	3,4850	3,7676
24	0,9639	0,6848	0,8569	1,3178	1,7109	2,0639	2,4922	2,7970	3,0905	3,4668	3,7454
25	0,9652	0,6844	0,8562	1,3163	1,7081	2,0585	2,4851	2,7874	3,0782	3,4502	3,7251
26	0,9664	0,6840	0,8557	1,3150	1,7056	2,0535	2,4786	2,7787	3,0669	3,4350	3,7066
27	0,9675	0,6837	0,8551	1,3137	1,7033	2,0488	2,4727	2,7707	3,0565	3,4210	3,6896
28	0,9685	0,6834	0,8546	1,3125	1,7011	2,0444	2,4671	2,7633	3,0469	3,4082	3,6739
29	0,9694	0,6830	0,8542	1,3114	1,6991	2,0402	2,4620	2,7564	3,0380	3,3962	3,6594
30	0,9702	0,6828	0,8538	1,3104	1,6973	2,0363	2,4573	2,7500	3,0298	3,3852	3,6460
40	0,9732	0,6807	0,8507	1,3031	1,6839	2,0211	2,4233	2,7045	2,9712	3,3069	3,5510
80	0,9758	0,6776	0,8461	1,2922	1,6641	1,9901	2,3739	2,6387	2,8870	3,1963	3,4163
120	0,9768	0,6765	0,8448	1,2888	1,6576	1,9799	2,3578	2,6174	2,8599	3,1595	3,3735
$\infty$	0,9744	0,6745	0,8416	1,2816	1,6449	1,9600	2,3283	2,5758	2,8070	3,0902	3,2905

Continuación anexo 1.

$n \setminus \alpha$	0,90	0,80	0,70	0,50	0,30	0,20	0,10	0,05	0,02	0,01	0,001
1	0,1584	0,3249	0,5095	1,0000	1,9628	3,0777	6,3137	12,7082	31,8210	63,6556	636,5778
2	0,1421	0,2887	0,4447	0,8185	1,3862	1,8856	2,9200	4,3027	6,9645	9,8250	31,5998
3	0,1366	0,2767	0,4242	0,7649	1,2498	1,8377	2,3534	3,1824	4,5407	5,8408	12,9244
4	0,1338	0,2707	0,4142	0,7407	1,1896	1,5332	2,1318	2,7785	3,7489	4,6041	8,6101
5	0,1322	0,2672	0,4082	0,7267	1,1558	1,4759	2,0150	2,5708	3,3649	4,0321	6,8685
6	0,1311	0,2648	0,4043	0,7178	1,1342	1,4398	1,9432	2,4489	3,1427	3,7074	5,6587
7	0,1303	0,2632	0,4015	0,7111	1,1192	1,4149	1,8946	2,3646	2,9979	3,4985	5,4081
8	0,1297	0,2619	0,3995	0,7064	1,1081	1,3968	1,8595	2,3060	2,8985	3,3554	5,0414
9	0,1293	0,2610	0,3979	0,7027	1,0997	1,3830	1,8331	2,2622	2,8214	3,2498	4,7809
10	0,1289	0,2602	0,3966	0,6998	1,0931	1,3722	1,8125	2,2281	2,7638	3,1693	4,5898
11	0,1286	0,2596	0,3956	0,6974	1,0877	1,3634	1,7959	2,2010	2,7181	3,1058	4,4369
12	0,1283	0,2590	0,3947	0,6955	1,0832	1,3562	1,7823	2,1788	2,6810	3,0545	4,3178
13	0,1281	0,2586	0,3940	0,6938	1,0795	1,3502	1,7709	2,1604	2,6503	3,0123	4,2209
14	0,1280	0,2582	0,3933	0,6924	1,0763	1,3450	1,7613	2,1448	2,6245	2,9788	4,1403
15	0,1278	0,2579	0,3928	0,6912	1,0735	1,3406	1,7531	2,1315	2,6025	2,9487	4,0728
16	0,1277	0,2576	0,3923	0,6901	1,0711	1,3368	1,7459	2,1199	2,5835	2,9208	4,0149
17	0,1276	0,2573	0,3919	0,6892	1,0690	1,3334	1,7396	2,1098	2,5669	2,8982	3,9651
18	0,1274	0,2571	0,3915	0,6884	1,0672	1,3304	1,7341	2,1009	2,5524	2,8784	3,9217
19	0,1274	0,2569	0,3912	0,6876	1,0655	1,3277	1,7291	2,0930	2,5395	2,8609	3,8833
20	0,1273	0,2567	0,3909	0,6870	1,0640	1,3253	1,7247	2,0880	2,5280	2,8453	3,8496
21	0,1272	0,2566	0,3906	0,6864	1,0627	1,3232	1,7207	2,0796	2,5176	2,8314	3,8193
22	0,1271	0,2564	0,3904	0,6858	1,0614	1,3212	1,7171	2,0739	2,5083	2,8188	3,7922
23	0,1271	0,2563	0,3902	0,6853	1,0603	1,3195	1,7139	2,0687	2,4999	2,8073	3,7676
24	0,1270	0,2562	0,3900	0,6848	1,0593	1,3178	1,7109	2,0639	2,4922	2,7970	3,7454
25	0,1269	0,2561	0,3898	0,6844	1,0584	1,3163	1,7081	2,0595	2,4851	2,7874	3,7251
26	0,1269	0,2560	0,3896	0,6840	1,0575	1,3150	1,7058	2,0555	2,4786	2,7787	3,7067
27	0,1268	0,2559	0,3894	0,6837	1,0567	1,3137	1,7033	2,0518	2,4727	2,7707	3,6895
28	0,1268	0,2558	0,3893	0,6834	1,0560	1,3125	1,7011	2,0484	2,4671	2,7633	3,6739
29	0,1268	0,2557	0,3892	0,6830	1,0553	1,3114	1,6991	2,0452	2,4620	2,7564	3,6595
30	0,1267	0,2556	0,3890	0,6828	1,0547	1,3104	1,6973	2,0423	2,4573	2,7500	3,6460
40	0,1265	0,2550	0,3881	0,6807	1,0500	1,3031	1,6839	2,0211	2,4233	2,7045	3,5510
80	0,1261	0,2542	0,3867	0,6776	1,0432	1,2922	1,6641	1,9901	2,3739	2,6387	3,4164
120	0,1259	0,2539	0,3862	0,6765	1,0409	1,2896	1,6578	1,9799	2,3578	2,6174	3,3734
$\infty$	0,128	0,253	0,385	0,674	1,036	1,282	1,645	1,96	2,326	2,576	3,291

Fuente: Garza, J., Morales. B., & González, B. (2013). *Análisis estadístico multivariante, un enfoque teórico y práctico.*

