

Mon  
664.117  
B982  
2012

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA**



**“ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL INCREMENTO DE PUREZA DE  
LA MIEL FINAL EN EL INGENIO MONTE ROSA EN  
CHINANDEGA”**

**TRABAJO DE DIPLOMA PRESENTADO POR:**  
Br. Byron Francisco Bustamante Trujillo

PARA OPTAR AL TÍTULO DE:  
**INGENIERO QUÍMICO**

**TUTOR:**  
Ing. Javier Enrique Ramírez Meza  
**Asesor:**  
Ing. Ronald Solís Mendoza

Managua, Nicaragua  
Diciembre de 2012

## **Agradecimiento**

Esto no es el fin de una carrera; sólo una milla más de una gran carrera, la vida. En la que, como pequeñas partículas, interactuamos continuamente para mantener la unión.

A todos los que en su momento me brindaron apoyo, ánimo, conocimiento o recursos. Siempre agradecido.

Dios, aunque nunca visto, siempre presente con su amor y paciencia.

Mis amigos, los hermanos que nunca tuve y siempre tendré.

A la dirección del Ingenio Monte Rosa, por permitir realizar este estudio en sus instalaciones.

Al personal de Recuperación de Azúcar de dicho ingenio, con méritos a los Ingenieros Oscar Mercado y Raúl Cáceres, Jefe de área y coordinador respectivamente, por su apoyo en conocimiento y recursos.

Al auditor de pérdidas, Ing. Ronald Solís, por compartir conocimiento y experiencia.

Infinitas gracias al Ing. Javier Ramírez, por su apoyo, conocimiento y consejos más allá de la tutoría de este trabajo.

## Dedicatoria

Porque sin mujeres no habría poesía, la vida se extinguiría.

A la mujer que siempre me ha amado. Esmeralda Trujillo, mi madre.

Al hombre que la ha amado y sin deberlo me ha apoyado. Manuel Alvarado, mi amigo.



## Resumen

Un problema común que afecta la pureza de la miel final, obtenida como un subproducto de la producción de azúcar para el consumo de la población, es el incremento de pureza que experimenta ésta, este hecho ha sido poco estudiado formalmente.

En el presente estudio se propuso determinar la incidencia de los factores; corriente eléctrica suministrada al motor del agitador en el cristalizador (este se relaciona con la temperatura de enfriamiento de la masa cocida), temperatura de recalentamiento de la masa antes de centrifugarse y la corriente eléctrica que controla la carga de masa en las centrífugas, sobre la disminución del incremento de pureza sobre la miel final en las centrífugas.

Para cumplir con este objetivo se siguió la siguiente metodología:

- Basado en la necesidad de la empresa se definió que se debían estudiar la incidencia de los factores antes mencionados; sobre el incremento de la pureza en la miel final. Por tanto se planteó un diseño de experimentos del tipo factorial completo, para determinar el número de corridas necesarias con sus respectivas condiciones de operación, así como las combinaciones de estos factores.
- Siguiendo el orden del diseño de experimentos se realizaron pruebas de laboratorio al Nutsch frío (esta es la miel filtrada de la masa proveniente de los cristalizadores, después que se ha enfriado) antes de centrifugar la masa, para determinar su pureza; a la miel final, para determinar su pureza; con la diferencia de pureza de la miel final menos el Nutsch frío, se determinó el incremento de pureza que experimentó la miel final, estas se compararon con modelos que determinan la pureza esperada para saber que tan alejada de la pureza esperada varía la pureza real.
- Se usó el Software estadístico Minitab 16 para procesar los datos y determinar el nivel de incidencia de cada factor en estudio y su posible interacción.
- Se estudió la incidencia de los factores individuales, su interacción y mediante análisis de varianza, gráficas de interacción y de cubos se determinó qué factores o interacciones son más importantes.

Los resultados reflejan que todos los factores antes mencionados tienen incidencia en el incremento de pureza de la miel final, sin embargo la interacción de la corriente eléctrica suministrada al motor del agitador en el cristalizador y la temperatura de recalentamiento es la más significativa, por otro lado la corriente eléctrica que controla la carga de masa en las centrífugas conviene mantenerla en un nivel bajo y es posible recalentar la masa 10°C desde el punto al que se enfrió en el cristalizador para evitar un alto incremento de pureza en las centrífugas.

Con base en los resultados obtenidos se recomienda centrifugar la masa a una tasa baja, mantener el gradiente de 10 °C de temperatura entre la temperatura de enfriamiento y la de recalentamiento de la masa cocida, estos resultados son congruentes con la teoría respecto a la centrifugación y cristalización por enfriamiento.

Debido a que sólo se pudo estudiar dos niveles en cada factor y sólo se incluyeron tres de los múltiples factores (disciplina tecnológica, la miel de lubricación a la masa, etc.) que posiblemente afecten el problema en estudio se recomienda realizar estudios posteriores tomando este como punto de referencia e incluir factores no estudiados en este estudio como: lubricación de las mieles, disciplina tecnológica, condiciones de la masa proveniente del tacho y factores humanos.

**Tabla de contenido**

Agradecimiento .....	ii
Dedicatoria .....	iii
Resumen.....	iv
<b>I. Introducción</b> .....	<b>1</b>
<b>II. Antecedentes</b> .....	<b>2</b>
<b>III. Justificación</b> .....	<b>3</b>
<b>IV. Objetivos</b> .....	<b>4</b>
5.1 Objetivos Generales.....	4
5.2 Objetivos Específicos.....	4
<b>V. Marco Teórico</b> .....	<b>5</b>
5.1 Generalidades del Azúcar de caña .....	5
5.2 Descripción general del proceso de recuperación de azúcar.....	6
5.2.1 Extracción .....	6
5.2.2 Clarificación de jugo.....	7
5.2.3 Evaporación .....	7
5.2.4 Clarificación de meladura.....	7
5.2.5 Cristalización.....	8
5.2.6 Centrifugación .....	8
5.2.7 Secado.....	8
5.3 Miel Final .....	11
5.3.1 Propiedades fisicoquímicas de la miel final.....	11
5.3.2 Aprovechamiento de la miel final .....	11
5.4 Características y Propiedades de la sacarosa .....	12
5.4.1 Solubilidad de la sacarosa .....	12
5.4.2 Número y coeficiente de solubilidad.....	13
5.4.3 Grado de saturación de la meladura y masa cocida .....	12
5.5 Sistemas de tres masas cocidas con doble agotamiento .....	14
5.6 Agotamiento de la masa cocida en los cristalizadores .....	15
5.6.1 Cristalización por enfriamiento.....	17
5.7 Centrifugación o purgado.....	20
5.8 Agotamiento de las mieles finales .....	21
5.8.1 Factores que afectan la pureza de las mieles.....	22
5.9 Modelos de pureza esperada .....	22
5.10 Diseño y análisis de experimentos.....	23

5.10.1	Conceptos básicos.....	24
5.10.2	Pasos a seguir en el diseño de experimentos.....	25
5.10.3	Diseño factorial .....	25
5.10.4	Procedimiento de análisis para un factorial $2^k$ .....	25
5.10.5	Estimación de los efectos de los factores y sus interacciones.....	25
5.10.6	Gráficas útiles para el análisis de incidencia de factores .....	27
5.10.7	Análisis de varianza .....	28
<b>VI.</b>	<b>Metodología.....</b>	<b>30</b>
6.1	Reconocimiento del proceso .....	30
6.1.1	Área de estudio .....	30
6.2	Determinación de la pureza esperada en miel final durante los primeros meses de la zafra 2011-2012.....	31
6.3	Implementación del diseño experimental.....	31
6.3.1	Identificación de factores incidentes en el estudio .....	31
6.3.2	Determinación de los niveles de cada factor.....	32
6.3.3	Tratamientos .....	32
6.3.4	Variables involucradas .....	33
6.3.5	Determinación del número de experimentos.....	33
6.4	Unidad experimental y muestreo .....	34
6.4.1	Definición de la unidad experimental .....	34
6.4.2	Muestreo .....	35
6.4.3	Métodos de análisis .....	36
6.5	Procesamiento de datos .....	36
<b>VII.</b>	<b>Presentación y Discusión de resultados .....</b>	<b>38</b>
7.1	Reconocimiento del área de estudio.....	38
7.2	Comparación de la pureza real contra la pureza esperada de las mieles finales durante los primeros meses de la zafra 2011-2012.....	39
7.3	Análisis de resultados del diseño de experimentos .....	45
7.3.1	Efectos principales para el incremento de pureza.....	48
7.3.2	Interacción de los factores para el incremento de pureza .....	49
7.3.3	Gráficas de cubos para el incremento de pureza y miel final ....	52
7.3.4	Análisis de residuos para el incremento de pureza .....	54
7.3.5	Efectos estandarizados para el incremento de pureza .....	55
7.3.6	ANOVA para el incremento de pureza .....	58
<b>VIII.</b>	<b>Conclusiones .....</b>	<b>61</b>
<b>IX.</b>	<b>Recomendaciones .....</b>	<b>63</b>
<b>X.</b>	<b>Bibliografía y sitios web consultados .....</b>	<b>64</b>

<b>XI.</b> Nomenclatura .....	67
<b>XII.</b> Glosario .....	69
Anexo A: Métodos de análisis .....	71
A.1 Determinación de purezas de magmas, mieles y jugos .....	72
A.2 Determinación de pureza de Nutsch .....	72
Anexo B: Cálculos .....	73
B.1 Balance general de materiales.....	74

## Lista de Tablas y Figuras

### Tablas

5.1	Composición química de la miel final.....	11
5.2	Propiedades físicas de la miel final.....	11
5.3	Vías de aprovechamiento de la miel final de caña de azúcar .....	11
5.4	Temperaturas recomendadas para el enfriamiento de la masa en el cristalizador.....	19
5.5	Temperaturas recomendadas para el recalentamiento en las centrifugas 20	
5.6	Número de réplicas recomendadas según el número de factores .....	24
5.7	Análisis de varianza para tres factores .....	29
6.1	Niveles de los factores.....	32
6.2	Tratamientos a desarrollar en el diseño de experimentos .....	33
7.1	Comparación de la pureza real contra las purezas esperadas .....	40
7.2	Medidas de tendencia central y variabilidad para los modelos de pureza esperada.....	45
7.3	Resultados del diseño de experimentos .....	47
7.4	Efecto de los factores principales .....	49
7.5	Interrelación del factor A y B para minimizar el incremento de pureza de miel final.....	51
7.6	Efecto de los factores para el incremento de pureza de miel final .....	52
7.7	Valores de F para distintos niveles de confianza Gráfica de efectos estandarizados al 95% de confianza .....	58
7.8	ANOVA para el incremento de pureza de la miel final al 95% de confianza Gráfica de efectos estandarizados con $\alpha=0.05$ .....	59
7.9	ANOVA para el incremento de pureza con $\alpha=0.1$ .....	59

### Figuras

5.1	Diagrama general del proceso azucarero .....	9
5.2	Flujograma del proceso azucarero.....	10
5.3	Diagrama del sistema de tres masas cocidas con doble agotamiento ..	15
5.4	Gráfico de solubilidad de sacarosa.....	16
5.5	Gráficos importantes para el análisis de experimentos.....	27
6.1	Puntos de muestreo.....	35
6.2	Equipos usados en los análisis de productos azucarados.....	36
7.1	Situación del incremento de pureza de la miel final.....	39
7.2	Pureza real vs pureza esperada de la miel final .....	44
7.3	Filtrado de Nutsch frío.....	45
7.4	Filtrado de miel final.....	46

7.5	Gráfica de efectos principales para el incremento de pureza de la miel final .....	49
7.6	Gráfica de interacción para el incremento de pureza de la miel final.....	50
7.7	Gráfica de cubos para el incremento de pureza de la miel final .....	53
7.8	Gráfica de cubos para la pureza de la miel final .....	54
7.9	Gráficas de residuos para el incremento de pureza de la miel final.....	55
7.10	Gráfica de efectos estandarizados al 95% de confianza .....	56
7.11	Gráfica de efectos estandarizados al 90% de confianza .....	57
7.12	Gráfica de efectos estandarizados al 85% de confianza .....	58

## I. Introducción

Todo ingenio azucarero pretende recuperar la mayor cantidad de sacarosa contenida en el jugo de caña. Sin embargo, su recuperación no se lleva a cabo en su totalidad, ya que durante el proceso productivo se tienen pérdidas de sacarosa, principalmente en las áreas de: Extracción de jugo (Bagazo), Filtración (Cachaza), Cristalización y Centrifugación (miel final), así como pérdidas indeterminadas en la cristalización y centrifugación de las mieles. Si bien estas pérdidas siempre están presentes en todo proceso de producción de azúcar, el esfuerzo se orienta a minimizar las pérdidas de sacarosa lo que conlleva a maximizar las ganancias de la empresa, así como preservar el medio ambiente.

Para cristalizar la sacarosa a partir de la meladura (jugo de caña concentrado) se usa un sistema de tres masas cocidas, cada una de estas masas se obtienen por la concentración de la meladura y mieles, se les asignan las letras A, B y C para diferenciar las masas según su pureza, siendo la masa A la de mayor pureza y la masa C la de menor pureza.

Las mayores pérdidas en la industria azucarera de acuerdo a la literatura y la experiencia se producen en el agotamiento de la miel final, obtenida de la centrifugación de la masa C, ésta representa por su volumen la de mayor importancia, por lo que se desea agotar al máximo esta masa en los tachos, cristalizadores y centrífugas. (Domínguez, 2003).

Debido a la baja pureza en esta masa se requiere continuar su agotamiento en el cristalizador por enfriamiento antes de centrifugarla; sin embargo, la alta consistencia que alcanza la masa fría requiere ser recalentada hasta la temperatura de saturación, para minimizar el incremento de pureza en centrifugas por fundición del grano. (Chen, 2000). Por otro lado este agotamiento alcanzado en el cristalizador se puede perder debido a un alto incremento de pureza en las centrífugas: ya sea por un recalentamiento excesivo de la masa o por una deficiente centrifugación.

Para estudiar los parámetros adecuados de enfriamiento de la masa en el cristalizador, recalentamiento en las centrífugas y la carga de masa en estas, se realiza este estudio en el área de recuperación del Ingenio Monte Rosa S.A., ubicado en la ciudad de Chinandega en el Km 148.5 de la carretera a Potosí, El Viejo.

## II. Antecedentes

El agotamiento de la miel final se mide por la pureza de ésta al salir del proceso, con el propósito de minimizar la pureza de la miel final se han realizado estudios principalmente Polanco, (2009) en USA y Domínguez (2003, 2004, 2007) en Cuba.

El ingenio Monte Rosa se fundó en 1948 manteniendo una operación continua, en el proceso de mejora continua se han detectado y solucionado diferentes problemas; hasta ahora no se había estudiado este fenómeno, aún cuando se conocía su impacto.

En la comunidad científica internacional se ha discutido acerca el agotamiento de la miel final, sin entrar en mucho detalle de la influencia que tiene el incremento de pureza en la miel final.

Domínguez (2004) en su estudio del agotamiento industrial de las mieles en Cuba, realizado en seis ingenios diferentes concluye que los factores más influyentes en el agotamiento de las mieles son problemas de disciplina tecnológica y la viscosidad de los materiales. Mientras que en otro estudio sobre el agotamiento de la miel final en Cuba (Domínguez 2003), hace una recopilación de diversos trabajos al respecto desde 1970 hasta 1999, donde se establecen parámetros de operación con el fin de minimizar estas pérdidas. En el estudio se concluye que la temperatura a que se enfría la masa en el cristalizador ha aumentado hasta 50 - 55 °C y respecto a la temperatura de recalentamiento hay muchas opiniones, lo que se debe cuidar es que el valor de la sobresaturación no sea menor de uno.

Polanco (2009) plantea que para minimizar el incremento de pureza en las centrífugas es recomendable evitar que el nivel de masa en los cristalizadores sea bajo aunque sólo lo menciona como sugerencia sin entrar en detalles.

### III. Justificación

En el proceso de fabricación de azúcar una de las mayores fuentes de pérdidas la constituye la miel final, éste material aún contiene azúcar, sin embargo, mediante métodos convencionales no es económicamente factible extraerle sacarosa más allá de cierto límite, por lo tanto en la industria azucarera se busca que su contenido de azúcar sea el mínimo que se pueda obtener mediante la tecnología convencional (Domínguez, 2003). Debido a esto, el agotamiento de la miel final es uno de los principales indicadores del rendimiento en la industria azucarera. El valor de estas pérdidas es el resultado de las operaciones previas de agotamiento, así como de algunas características de la materia prima.

La masa cocida de menor pureza (definida como masa C) es la última que se obtiene del sistema de cocimiento y de ella se deriva la miel final, misma que abandona el proceso y no es posible seguir utilizando en el ingenio azucarero, razón por que es deseable que la pureza de la miel final sea la mínima posible.

En el cristalizador la masa se agota debido a la cristalización por enfriamiento, pero adquiere una consistencia viscosa, por lo que no se puede centrifugar y requiere recalentarse hasta su temperatura de saturación o diluir con miel, es práctica común recalentar la masa antes de centrifugarla, si esta temperatura es demasiado alta parte de los cristales se fundirán aumentando la pureza de la miel final, además para facilitar la centrifugación se agrega agua a la centrifuga, lo que puede aumentar aún más la dilución de cristales

En el ingenio Monte Rosa no se ha realizado un estudio similar que estudie el fenómeno de incremento de pureza de la miel final en las centrífugas, lo ideal es disminuir el incremento de pureza, en el presente estudio se pretende determinar la incidencia del enfriamiento (corriente eléctrica suministrada al motor del agitador en el cristalizador) y la temperatura de recalentamiento de la masa a la salida del cristalizador, así como la corriente eléctrica que controla la carga de masa C a la centrífuga que influye en minimizar el incremento de pureza en la miel final.

## **IV. Objetivos**

### **4.1 Objetivo General**

1. Estudiar experimentalmente el efecto de los factores que inciden en la disminución del incremento de pureza de la miel final en el cristizador y centrifugas.

### **4.2 Objetivos Específicos**

1. Evaluar las condiciones de agotamiento de la miel final en el área de cristalización durante los primeros meses de la zafra 2011 – 2012, aplicando los modelos de pureza esperada.
2. Determinar la incidencia de las condiciones de operación (temperatura de enfriamiento y recalentamiento de la masa C) en el cristizador, así como la corriente eléctrica que controla la carga de masa C en centrifugas, que contribuyan a minimizar el incremento de pureza en la miel final.
3. Estudiar el efecto de la corriente suministrada al motor del agitador en el cristizador, y de la temperatura de recalentamiento, así como la corriente eléctrica que controla la carga de la masa C a la centrifuga en el incremento de pureza de la miel final.

## V. Marco Teórico

### 5.1 Generalidades del Azúcar de Caña

La sacarosa contenida en la caña de azúcar se recupera de la planta mediante el proceso tecnológico descrito en el acápite 5.2, el tiempo de recuperación comúnmente llamado zafra se extiende en Nicaragua, durante los meses de noviembre a mayo. La caña de azúcar que se cultiva hoy en día es un híbrido complejo de dos o más de las cinco especies del género *Saccharum*. Las muchas estaciones de mejoramiento en todo el mundo se multiplicaron, llevando al abandono del uso de los nombres de las variedades para llamarlas por códigos:

B: Barbados

Co: Coimbatore, India

CB: Campos, Brasil

CP: Canal Point, Florida

D: Demerara, Guayana

F: Formosa

H: Hawaii

N: Natal, África del Sur

NA: Santa Rosa, Argentina

NCo: Cruzada en Coimbatore,  
Seleccionada en Natal

NG: Colectadas en Nueva Guinea

POJ: Proefstation Oost Java

PR: Puerto Rico

La anterior sólo es una pequeña lista para mostrar las distintas variedades, como ejemplo tómese la variedad CP 65-357 que se obtuvo a partir de la semilla de una cruce realizada en Canal Point, Florida. Todas las plantas verdes producen azúcar para su crecimiento y metabolismo, pero sólo algunas almacenan un sobrante, este sobrante acumulado se puede almacenar en las hojas, capullos y tallos de las plantas. La calidad de la caña en el campo tiende a mejorar con la edad, llega a un máximo y luego declina. A partir del momento que se corta la caña inicia un proceso de deterioro. Después de cortada la caña pierde agua (1 a 2% diario, la primera semana), además de la inversión por acción enzimática, química y microbiana. La enzima invertasa está en la caña de manera natural, ésta convierte la sacarosa en azúcares invertidos (glucosa y fructosa) disminuyendo así la pureza, el deterioro químico incluye la inversión causada por las condiciones ácidas, las que aumentan a medida que se deteriora la caña. (Chen, 2000).

Los productos microbianos cambian aún más con el tiempo para formar ácidos y compuestos coloreados. El deterioro microbiano es causado principalmente por una bacteria del género *Leuconostoc*, aunque existen otros tipos de bacterias que invaden la caña cortada. Investigaciones han mostrado que *Leuconostoc mesenteroides* (y algunas veces *Leuconostoc dextranicum*) eran los microorganismos responsables de la fermentación de la caña, la pérdida de sacarosa y la formación de dextrano.

La sacarosa en el jugo de caña y la celulosa en la fibra son los principales constituyentes químicos de la caña. Cuando la sacarosa se hidroliza se descompone en sus dos azúcares simples: glucosa y fructosa. La producción de azúcar a partir del jugo se basa en la capacidad de la sacarosa para formar cristales, mientras que la glucosa y fructosa permanecen disueltas.

## **5.2 Descripción General del proceso de Recuperación de Azúcar**

La producción de sacarosa se da en el proceso agrícola, en el Ingenio Monte Rosa la fábrica realiza la recuperación de esta sacarosa mediante las etapas del proceso que se muestran en la Figura 5.2.

**5.2.1 Extracción del jugo:** Esta es la primera etapa del proceso de fábrica, la caña proveniente del campo luego de pasar por las básculas y el laboratorio de caña, para realizarle análisis de pureza al jugo, entra a los molinos. (Batule, 2001)

La caña se prepara para la molienda mediante cuchillas giratorias que cortan los tallos en trozos pequeños, luego pasan a una desfibradora y desmenuzadora (según sea el arreglo) donde se desmenuza la caña, pero no se extrae jugo. Posteriormente esta pasa al tándem de molinos de 4 o 5 molinos en serie que

utilizan combinación de tres rodillos o cuatro, los cuales exprimen la caña, y con la aplicación de agua de imbibición (agua caliente) por aspersión se logra obtener la mayor extracción del jugo, obteniéndose así jugo diluido y bagazo.

En el ingenio Monte Rosa, se usa una combinación de 5 molinos en series de 4 mazas cada molino. Cuando el jugo sale del quinto molino se hace pasar por un tamiz, que retiene partículas de bagazos finísimas, llamadas bagacillo, el cual contiene azúcar que no se recupera. Mientras que el jugo que pasa es enviado a la etapa de clarificación.

Imbibición: Proceso en el que se aplica agua que puede ser caliente o fría al bagazo para aumentar la extracción de jugo en el siguiente molino. Esta puede ser imbibición simple, Imbibición compuesta, compuesta múltiple según el arreglo de donde se agregue agua. Para más detalle se recomienda revisar obras dedicadas al tema.

**5.2.2 Clarificación del jugo:** El jugo diluido proveniente de los molinos es de color verde oscuro, ácido y turbio, el cual es causado por impurezas solubles e insolubles por lo que su remoción se realiza mediante el proceso de clarificación, empleando lechada de cal (meladura o jugo claro mezclado con óxido de calcio, CaO), para neutralizar la acidez del jugo y formar sales insolubles de cal que precipitan logrando así obtener un jugo claro. Cuando se prepara azúcar especial se requiere de una etapa inmediatamente anterior a la alcalización, esta es la sulfitación, se realiza en una torre de sulfitación a contracorriente.

El jugo sulfitado y alcalizado pasa por una serie de calentadores antes de clarificar, los lodos se separan del jugo clarificado por sedimentación y se filtran en filtros rotatorios o filtros de banda. El jugo filtrado retorna al proceso y la torta de filtro (cachaza) se usa para abono de las tierras donde se cultiva la caña de azúcar. En esta etapa se pierde azúcar debido al contenido de pol en la cachaza.

**5.2.3 Evaporación:** El jugo clarificado y filtrado proveniente de etapa anterior contiene aproximadamente 85% de agua. Dos terceras partes esta agua se elimina en evaporadores al vacío (permitiendo una disminución de la temperatura de ebullición), la empresa cuenta con un arreglo de 5 evaporadores conectados en serie, de los cuales el primero se desempeña como un pre-evaporador seguido de un cuádruple efecto. El producto obtenido después de la evaporación es meladura, la cual es enviada al proceso de clarificación.

**5.2.4 Clarificación de meladura:** El proceso es similar a la fosfatación en una refinería, en este caso se añade a la meladura cal y ácido fosfórico, luego se airea junto con la adición de un polímero floculante, entonces la meladura pasa a

un clarificador. Seguidamente la meladura clarificada se envía al proceso de Cristalización.

**5.2.5 Cristalización:** La etapa de cristalización comienza en los tachos, estos son recipientes cilíndricos con fondo cónico, funcionan como evaporadores de simple efecto. En los tachos se evapora agua hasta que se alcanza un grado de sobresaturación en que comienzan a formarse los cristales de azúcar. Al igual que los evaporadores, los tachos operan al vacío para bajar la temperatura de evaporación del agua, evitando así que las altas temperaturas caramelicen el azúcar.

Cuando se cocen masas de alta pureza, estas se centrifugan después de salir de los tachos, mientras que para masas de baja pureza se requiere usar cristalizadores con movimiento y enfriamiento, hasta lograr su agotamiento y pasar a ser centrifugadas. Según el arreglo de masas cocidas que se use, puede ser de dos, tres o cuatro masas, actualmente el sistema más común es el de tres masas. Cuando en los tachos se ha alcanzado el tamaño de grano adecuado, las masas se mandan a un recibidor que cuenta con agitador para evitar que los cristales sedimenten, de estos recibidores se alimentan a las centrífugas.

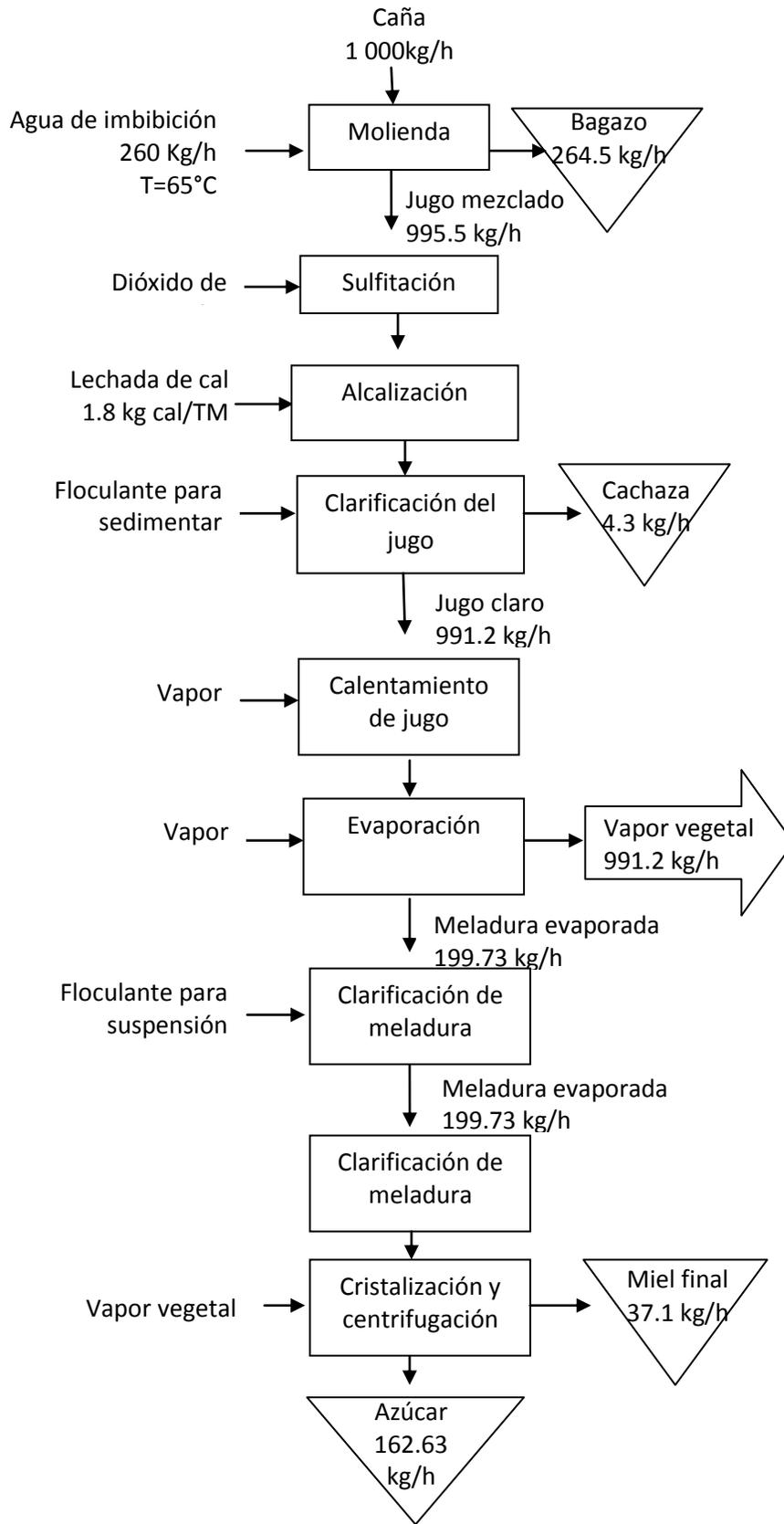
**5.2.6 Centrifugación:** La centrifugación aprovecha la fuerza centrífuga (500 a 1800 veces la fuerza de gravedad) para separar las mieles, las cuales salen del canasto de la centrífuga y el azúcar queda retenido dentro de esta. Cuando se procesa con el sistema de tres masas, las masas A se separan en mieles A y azúcar comercial, las masas B en mieles B y magmas B y las masas C en miel final y magma C. Usualmente para masas A se usan baterías de centrifugas Batch y para masas B y C se usan centrifugas continuas. Los cristales de azúcar se envían al proceso de Secado.

**5.2.7 Secado:** Si el contenido de humedad del azúcar disminuye, su deterioración se hace más lenta. El azúcar crudo contiene agua que varía del 0.5 al 2% esta cantidad puede reducirse del 0.2 al 0.5% usando un secador. El procedimiento para secar el azúcar con aire caliente consiste en calentar el aire para aumentar su capacidad de absorción de humedad al ponerlo en contacto con el azúcar.

El secador más común en los países tropicales es el secador horizontal giratorio que consiste de un tambor secador seguido de uno enfriador. (Hugot, 1986).

En la Figura 5.2 se muestra el flujograma del proceso de Recuperación de azúcar en un ingenio azucarero.





**Figura 5.2: Flujograma del proceso azucarero**  
*Elaboración propia*

### 5.3 Miel final

#### 5.3.1 Propiedades fisicoquímicas de la miel final

La miel final se obtiene de la centrifugación de la masa C en las centrifugas continuas, es una mezcla compleja que contiene sacarosa, azúcar invertido, sales y otros compuestos solubles en álcali que normalmente están presentes en el jugo de la caña así como los formados durante el proceso de fábrica, en las Tablas 5.1 y 5.2 se muestran la composición química y las propiedades fisicoquímicas de la miel final, respectivamente.

**Tabla 5.1: Composición Química de la miel final**

Composición	Porcentaje
Agua	20
Sacarosa	35
Glucosa	7
Levulosa	9
Otras sustancias reductoras	3
Otros carbohidratos	4.1
Cenizas	12
Compuestos nitrogenados	4.5
Compuestos no nitrogenados	5
Ceras, esteroides y esterofosfolípidos	0.4

Fuente: Delgado, 2003 citado por Vega, 2007

**Tabla 5.2: Propiedades Físicas de la miel final**

Olor	Dulce
Color	Café
Sabor	Dulce amargo
Viscosidad	Depende de su composición química, se considera un fluido pseudoplástico
pH	5.5 - 6.5

Fuente: Téllez, 2004; Yopez, 1995 citado por Fajardo y Sarmiento, 2007 y Mechetti, 2011

#### 5.3.2 Aprovechamiento de la miel final

**Tabla 5.3: Vías de aprovechamiento de la miel final de caña de azúcar**

Utilización	Generalidades
Alimentos	Alimentación rica
Animales	Alimentación menos rica: desecados sobre pulpas, mezcla de diversos alimentos, pulverizado de forrajes, suplemento de ensilajes
Recuperación de líquidos desazucarados	Vinazas para la obtención de ácido glutámico

	Lejías finales como alimento animal y para la obtención de aminoácidos
Fermentación	<p>Levaduras para panificación</p> <p>Levaduras para alimentación humana y animal; aditivo para piensos, extractos e hidrolizados de levadura, fuente de enzimas, vitaminas y ácidos nucleicos, además es el sustrato utilizado en la producción unicelular.</p> <p>Grasas de levadura</p> <p>Alcohol etílico</p> <p>Productos colaterales de fermentación alcohólica</p>

Fuente: Ariza y Gonzáles 1997 citado por Fajardo y Sarmiento, 2007

Debido a que los residuos de la melaza poseen un contenido importante de grupos OH, los cuales podrían estar disponibles para la reacción con el isocianato, se consideró su utilización como sustituyente parcial del polioli que se usa comúnmente en la elaboración de bioespumas de poliuretano. Los poliuretanos son polímeros de importancia económica por la gran variedad de usos en la industria (Woods, 1990). La ventaja de los poliuretanos elaborados con melaza de caña de azúcar es la de ser potencialmente biodegradables, es decir, se descomponen más rápido que los materiales obtenidos con reactivos derivados del petróleo (Moya y col., 1995; Vega-Baudrit y col., 2005 citado por Vega-Baudrit, 2007).

## 5.4 Características y Propiedades de la sacarosa

### 5.4.1 Solubilidad de la sacarosa

La solubilidad de la sacarosa en agua pura es alta y se ve influenciada por la temperatura, a temperatura ambiente es de dos partes de sacarosa por cada parte de agua y a 100°C la solubilidad aumenta a cinco partes de sacarosa por cada parte de agua.

Charles publicó sus mediciones de la concentración de saturación a 37 diferentes temperaturas (0,6 a 86,1°C) y derivó la Ecuación 5.1 para la solubilidad de la sacarosa de 0 a 90°C. (Chen 2000 y Rein 2007).

$$S = 64,397 + 0,07251t + 0,0020569t^2 - 9,035 \times 10^{-6}t^3 \quad \text{Ec. 5.1}$$

Donde S es el porcentaje de sacarosa (%) en solución saturada y t es la temperatura (°C).

El jugo de caña, la meladura y otros intermedios azucarados no son sustancias puras, la solubilidad de la sacarosa depende, además de la temperatura, de la naturaleza y la concentración de las impurezas, estas varían por los efectos agrícolas, clima, variedad de caña y el proceso de fábrica.

Las sales inorgánicas tienden a aumentar la solubilidad, el azúcar invertido la reduce y otros componentes no azúcares parecen tener poca influencia. (Chen, 2000).

#### 5.4.2 Número y coeficiente de Solubilidad

La solubilidad de la sacarosa en una solución impura, como lo es el jugo de caña, meladura y otros intermedios, generalmente se expresa como partes de sacarosa por 100 partes de agua en el estado de saturación, esta relación se denomina **número de solubilidad**.

El **coeficiente de solubilidad (CS)** es el número de solubilidad de la solución impura dividido entre el número de solubilidad de la sacarosa pura a la misma temperatura. (Clark y García, 1969).

Para determinar el CS de una solución se usa como referencia agua saturada a la misma temperatura que la solución en estudio.

$$CS = \frac{S}{S_{sat}} \quad \text{Ec. 5.2}$$

Donde: S es la cantidad de sacarosa por cada 100 partes de agua a una pureza R y  $S_{sat}$  es la cantidad de sacarosa por cada 100 partes de agua saturada de pureza 100

#### 5.4.3 Grado de saturación de la meladura o de la masa cocida

Cuando una solución está saturada a determinada temperatura, y se enfría o se le evapora parcialmente el disolvente, esta alcanzará un estado de sobresaturación, es decir que tendrá más sacarosa de la que puede disolver. Por el contrario, si se añadiera más disolvente a una solución saturada esta tendría un estado de insaturación, mientras que si en un punto del proceso se tiene una masa cocida insaturada los cristales de la masa cocida empezarán a disolverse hasta alcanzar un estado de equilibrio (saturación) (Chen, 2000).

El **grado de sobresaturación (°SS)** indica cuantas veces está más o menos saturada una solución, con respecto a otra que está saturada a la misma pureza y temperatura.

$$^{\circ}SS = \frac{CM}{CM^*} \quad \text{Ec. 5.3}$$

Donde CM es la concentración del material en estudio y CM\* es la concentración de saturación a la misma temperatura y pureza del material de estudio.

El valor del denominador corresponde a datos de solubilidad de sacarosa en tablas, y el numerador corresponde a análisis de laboratorio.

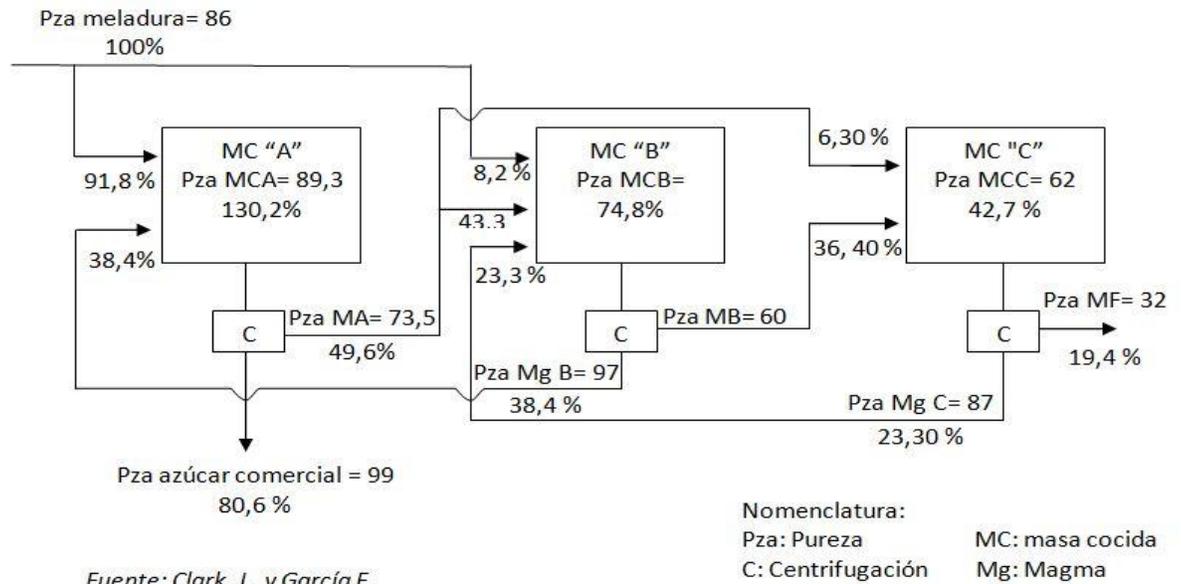
### **5.5 Sistema de 3 Masas Cocidas con doble agotamiento o sistema de doble Einwurf**

En este sistema el magma C se emplea como semilla para la MCB, el magma B se utiliza como semilla para la MCA, las cuales se hacen vírgenes (es decir con meladura que no ha entrado al sistema de masas) y resultan de muy alta pureza, como nunca va magma C directamente a la MCA, la recirculación de miel final es sólo para la MCB.

La alta pureza de la MCA (que es de 89,3 en el diagrama y que representa una subida de 3,3 puntos por sobre el nivel de pureza de la meladura) proviene de la alta pureza (97) que tiene el magma B, el cual como ya se explicó es el que sirve de pie para la MCA.

Este sistema requiere mayor capacidad de centrifugas de primera que los sistemas convencionales. En la Figura 5.3 se muestra el flujo probable cuando la pureza de la meladura es 86

**Sistema de 3 MC de doble Einwurf**



**Figura 5.3:** Diagrama del sistema de tres masas con doble agotamiento

**5.6 Agotamiento de la masa en los Cristalizadores**

La cristalización es el proceso de formación de cristales sólidos, este proceso inicia en los tachos, aunque en el lenguaje de la fábrica la cristalización se refiere a la continuidad del agotamiento de la masa cocida en los cristalizadores una vez que en los tachos no es viable seguir agotándola, si se observa la Figura 5.4 de la solubilidad de la sacarosa se notará que al enfriar la masa a una concentración constante el punto de solubilidad desciende permitiendo que se alcance un mayor grado de sobresaturación (denotado por "y").

La fuerza motriz para la cristalización es la sobresaturación, el crecimiento de los cristales depende de muchos factores como temperatura, área superficial del cristal, condiciones dinámicas del fluido y la naturaleza y concentración de las impurezas.

Debe cuidarse de que la velocidad de enfriamiento no sea tan rápida que cause la formación de falso grano o aumento excesivo de viscosidad.

Esto es particularmente muy importante en el tratamiento de masas deficientes en volumen de granos y menos significativo a medida que el volumen de grano se aproxima al límite máximo.



Fuente: Polanco, Assessment of Target Purity difference for a Louisiana Sugar Mill

**Figura 5.4:** Solubilidad de la sacarosa a distintos grados de sobresaturación.

En la práctica, el agotamiento de las mieles comprende cuatro pasos:

1. Evaporar una masa cocida a la consistencia máxima posible en un tacho al vacío.
2. Enfriar la masa cocida en el cristizador para que cristalice la sacarosa que permanece en solución y es recuperable.
3. Recalentar la masa cocida fría hasta su temperatura de saturación para reducir la viscosidad.
4. Separar por centrifugación los cristales de las mieles agotadas.

**La velocidad de cristalización se ve afectada por:**

1. **Viscosidad:** Cuando la viscosidad aumenta, disminuye la velocidad de cristalización por que se dificulta la difusión de los cristales desde la miel hacia los cristales formados.
2. **Temperatura (esta afecta a la viscosidad):** Cuando la temperatura decrece, para mantener la velocidad de cristalización se requiere aumentar la sobresaturación.
3. **Sobresaturación:** La sobresaturación favorece la velocidad de cristalización, aunque en la práctica la sobresaturación no debe exceder el valor crítico de 1,44. De lo contrario la operación puede salir de control y formarse falso grano.

- 4. Pureza del licor madre:** La velocidad de cristalización cae cuando la pureza del licor decrece, por eso es que las masas pobres toman más tiempo para agotarse.

El Control de la operación de cristalización y agotamiento de las mieles implica comparar los resultados reales con los resultados que se esperan de los procedimientos normales establecidos.

Los parámetros que usualmente se monitorean en el laboratorio de fábrica, para monitorear el proceso, son los siguientes:

1. Masa cocida al cristizador: Pureza, temperatura, contenido de cristales, tamaño de grano, grados de sobresaturación ( $^{\circ}\text{SS}$ ), caída de pureza.
2. Cristizador: Velocidad de enfriamiento, temperatura, flujo de agua de enfriamiento, temperatura mínima de enfriamiento, tiempo de retención a la temperatura mínima, temperatura de saturación, viscosidad para el centrifugado deseado, grado y velocidad de recalentamiento para dar la viscosidad deseada a la temperatura de saturación y temperatura del agua de recalentamiento y enfriamiento.
3. Pureza: de las masas a la salida del tacho, miel final, azúcar comercial, pureza esperada, Nutsch. De esta se obtienen: cristales en masa cocida, caída de pureza, aumento de la pureza por recalentamiento, eficiencia de purga.
4. Densidad: los sólidos de la masa cocida y de las aguas madres a la salida del tacho indicarán si la masa cocida se ha evaporado hasta la densidad óptima para agotamiento.
5. Temperatura de saturación: de las masa cocidas al cristizador, antes de recalentar, purga, de esto se puede obtener el  $^{\circ}\text{SS}$  así como el momento adecuado para iniciar y finalizar el recalentamiento.
6. Volumen aparente de cristales: de las masas cocidas en el cristizador
7. Tamaño de grano: en las masas cocidas y cristizador

No todas las fábricas controlan la totalidad de los parámetros mencionados, se debe decidir que parámetros controlar en dependencia del modo de operación del proceso (manual o automático).

#### **5.6.1 Cristalización por enfriamiento con agitación**

Las masas cocidas de baja pureza, después de haberse sometido a evaporación hasta alcanzar la máxima consistencia manejable en el tacho, se descargan en los cristalizadores a una temperatura entre 65 y 70°C y un  $^{\circ}\text{SS}$  de 1,20.

La cristalización en movimiento es una operación en la cual se agita la masa cocida lentamente a medida que se enfría. La disminución de temperatura reduce la solubilidad y hace que la cristalización continúe.

La agitación constante disminuye las diferencias internas de temperatura y la sobresaturación, reduciendo así el peligro de formación de falso grano.

La velocidad de cristalización es determinada por el grado de sobresaturación, la temperatura, el área superficial de los cristales y la naturaleza y concentración de las impurezas. La viscosidad también se ve afectada por estos factores, y el límite hasta el cual se puede enfriar la masa depende de las características del cristizador para manejar las altas viscosidades. Es por esto que la viscosidad es un factor dominante en el proceso.

Cuando la temperatura de la masa cocida se ha reducido hasta la mínima temperatura manejable y las mieles han sido prácticamente agotadas la masa es muy viscosa para lograr una separación satisfactoria de los cristales a partir de las mieles por centrifugación. Puesto que en este punto las aguas madres están aún sobresaturadas, es posible reducir la viscosidad sin que se produzca dilución de los cristales formados llevándolas a un estado de saturación, ya sea por calentamiento hasta la temperatura de saturación o por dilución. (Chen, 2000).

La temperatura mínima hasta la cual puede llevarse la masa cocida varía con las características de ésta y la capacidad del cristizador para manejar la viscosidad, es usual que se encuentre entre 45 y 50°C cuando la masa cocida es de alta densidad y arriba de 35°C en el caso de masas de baja densidad.

Domínguez en su estudio del agotamiento de mieles en Cuba, recopila información acerca de las temperaturas mínimas, máximas, gradientes de temperatura y velocidad de agitación de la masa C. La Tabla 5.4 muestra las temperaturas mínimas reportadas.

**Tabla 5.4:** Temperaturas de enfriamiento recomendadas

Años	Valores de temperaturas de enfriamiento recomendados	Autores
1960	41 – 43	Berr
1960	38	Hugot
1963	38	Jenkins
1965	40 – 45	Hames
1974	37 – 40	Valdés
1975	40 – 45	Spencer- Meade
1975	38 – 40	Pedrosas
1979	45 – 50	Rguez y Delgado
1980	38	Gallardo
1982	50	Carrazana
1984	40 – 45	Morrel
1985	50	Morera
1988	40	Mantovani Vaccari
1995	50 - 55	MINAZ*
1999	50 - 55	López*

*Fuente: Domínguez, (2003)*

Se puede observar que la tendencia en los últimos años es de aumentar la temperatura de enfriamiento, es decir el límite al que se puede enfriar es menor.

Se ha estudiado el enfriamiento rápido y lento y se encontró una marcada ventaja en el enfriamiento rápido hasta un periodo de cristalización de 30 horas, después de 30 horas hubo poca diferencia en los regímenes de enfriamiento.

Estudios realizados en Queensland muestran que el enfriamiento puede ser muy rápido sin peligro de formación del falso grano, ya que la cristalización al momento de descargar el tacho hace que la temperatura de saturación disminuya 2,2 a 4,4 °C/h, mientras que el enfriamiento sólo se logró a una rapidez de 1,1 a 1,7°C/h.

Tanto la temperatura mínima como la saturación son mayores para masas de alta densidad que para las de baja densidad. Cuando se ha alcanzado la temperatura mínima se deja que la cristalización continúe hasta que se hace demasiado lenta para propósito práctico.

Cuando la cristalización se detiene es necesario recalentar la masa para disminuir la viscosidad antes de centrifugar, la temperatura hasta la cual se recalienta es la de saturación. Este recalentamiento se puede hacer en el cristizador, haciendo fluir agua caliente por el medio de calentamiento, entre el cristizador y la centrifuga o inmediatamente antes de la centrifuga.

Con una buena masa cocida de alta densidad la temperatura de saturación es mayor logrando disminuir aún más la viscosidad al calentar. Se puede recalentar hasta 55°C, esto depende de las características de la masa.

**Tabla 5.5:** Temperaturas de recalentamiento recomendadas

Años	Valores de temperatura recomendados	Autor
1965	50 – 55	Hames
1969	40 – 45	Payne
1975	Aumentar 5	Spencer, Meade
1981	55	Ríos
1968	aumentar de 3 – 5	Thompson
1979	53 – 56	Rguez y Delgado
1982	55	Carrazana

*Fuente: Domínguez, (2003)*

### 5.7 Centrifugación o Purgado

Cuando la cristalización ha terminado, ya sea en el tacho o en el cristizador, la masa cocida pasa a un recibidor que consiste de un recipiente con agitación mecánica para evitar que los cristales formados se asienten. De estos recibidores se alimentan las centrifugas constantemente.

Una centrifuga consiste en un tambor perforado o canasta que gira sujeta de un eje. La canasta gira dentro de una envoltura metálica llamada cubierta o caja que recoge las mieles expelidas por la fuerza centrífuga. La canasta tiene paredes verticales perforadas revestidas hacia el centro, primero con una malla de sostén de alambre de latón y luego con una lámina perforada conocida como revestimiento.

Las centrifugas pueden operar en modo continuo o en modo batch, las centrifugas continuas se usan para centrifugar masas B y C, en cambio las del tipo batch se usan para centrifugar el azúcar comercial.

Las ventajas de las continuas se aprecian en bajos costos de mantenimiento, menor consumo de energía, simplificación mecánica y eléctrica.

La rotura indeseable de cristales, formación de terrones y otras consideraciones relacionadas con la calidad del azúcar impiden el uso de centrífugas continuas para el purgado de azúcar comercial, refinado o crudo de alta pureza.

En la parte superior se encuentra el motor que ejerce la rotación, la canasta permite el paso de la miel, pero retiene el azúcar. Generalmente se emplean varias baterías en línea formando lo que se conoce como baterías de centrífugas.

En las de tipo batch el operador arranca la máquina y carga la canasta con la masa cocida, la fuerza centrífuga hace que la masa suba por la parte exterior de la canasta, mientras la malla retiene el azúcar expulsa la miel, cuando el ciclo ha terminado, se detiene la centrifuga.

En las de tipo continuo la masa se alimenta constantemente a la centrifuga, la cual gira a revoluciones de hasta 2000 rpm (según la masa) y separa la miel del magma.

### **5.8 Agotamiento de las Mieles Finales**

La mayor pérdida de azúcar en la fábrica se encuentra en las mieles finales, factores del proceso como densidad de las masas cocidas, grado de enfriamiento en los cristalizadores, entre otros afectan el grado de agotamiento de las mieles. La viscosidad también tiene gran influencia porque es uno de los factores que limitan la concentración de la masa cocida y la sobresaturación de las mieles.

Para cualquier situación particular, el agotamiento de las melazas es posible maximizarlo si se cumplen las siguientes condiciones: (Chen, 2000).

1. La masa cocida se evapora a la densidad máxima dentro de los límites impuestos por la capacidad de los cristalizadores y centrífugas.
2. Las aguas madres de la masa cocida se concentran hasta una densidad que origine, después del acondicionamiento en el cristalizador, una temperatura de saturación en las mieles finales cercana a 55 °C.
3. El área superficial cristalina de la masa cocida con respecto a las aguas madres es tan alta como la manejabilidad lo permita.
4. El tamaño de los cristales sea lo suficientemente grande para permitir la buena separación de cristales y melazas en la centrifugación.
5. La viscosidad de las mieles finales a la temperatura de saturación es tan alta como lo permita la buena separación de cristales y melazas en las centrífugas, de 500 a 1 200 poises.
6. La pureza de la masa cocida es lo suficientemente alta para proporcionar el contenido cristalino óptimo.

### 5.8.1 Factores que afectan la pureza de las mieles

1. Relación Azúcares Reductores/Cenizas (AR/C): La pureza de las mieles disminuye cuando la relación AR/C aumenta, por esta razón es deseable que la cantidad de cenizas que se formen en el proceso sean mínimas.
2. No azúcares/agua (NA/A): Según Grunt la relación óptima de NA/A es 2,9. Para lograr mieles de baja pureza la masa cocida que va a los cristalizadores debe ajustarse. Si el valor NA/A se mantiene constante durante el enfriamiento de la masa cocida en los cristalizadores, se puede alcanzar la máxima velocidad de cristalización posible.

### 5.9 Modelos de Pureza esperada

Es aquella que representa una miel final totalmente agotada, que tan cerca de esta pureza se encuentran las de las mieles finales es un indicador del grado de agotabilidad de la miel. A continuación se describen algunos modelos a utilizar para la determinación del agotamiento de la miel

Micheli y De Gyulay proponen el índice de agotabilidad como una medida de que tanto se agotó la miel, esta se determina por medio de la Ecuación 5.4.

$$E = \frac{100 - Q}{E_o} \quad \text{Ec. 5.4}$$

Dónde: E es el índice de agotabilidad, Q es la pureza real de mieles y Eo es la agotabilidad la cual se determina mediante la Ecuación 6. 5.

$$E_o = 100 - Q_L \quad \text{Ec. 5.5}$$

Donde:  $Q_L$  es la menor pureza obtenible en una fábrica bien equipada y controlada (sujeto a economía local),  $Q_L$  es el valor de pureza reportado por el laboratorio, el objetivo es reducir la diferencia ( $Q - Q_L$ ).

Por otro lado Douwes-Decker desarrollaron el modelo que consiste en implementar las Ecuaciones 5.5 y 5.6 que permitan determinar la pureza real esperada.

$$P_{z\text{real esperada}} = 35,886 - 0,08088R + 0,26047A \quad \text{Ec. 5.6}$$

Esta ecuación fue revisada por Sugar Milling Research Institute (SMRI) y reescrita así

$$SMRI = 39,94 - 19,60 \log\left(\frac{AR}{C}\right) \quad \text{Ec. 5.7}$$

Para el control de fábrica se puede usar así

$$P_{\text{zaa lograr}} = 39,94 - 19,60 \log \left( \frac{\text{AR}}{\left( \frac{8,4}{100} \right) * (\text{conductividad específica}) + 0,8} \right) \quad \text{Ec. 5.8}$$

Donde AR: es el % de no sacarosa en los AR, A: % de no sacarosa en las Ceniza, AR: azúcares reductores, y C: cenizas

El Queensland sugar Research Institute plantea la Ecuación 6.9 para determinar la pureza verdadera esperada

$$\text{Pureza verdadera esperada} = 40,67 - 17,80 \log \left( \frac{\text{AR}}{\text{Cenizas}} \right) \quad \text{Ec. 5.9}$$

Kelly,

$$\text{Pureza verdadera esperada} = 40 \left( \frac{\text{AR}}{\text{Cenizas}} \right)^{0,2} \quad \text{Ec. 5.10}$$

Hugot,

$$\text{Pureza Clerget} = 40 - 4 \left( \frac{\text{AR}}{\text{Cenizas}} \right) \quad \text{Ec. 5.11}$$

Estas ecuaciones no se desarrollaron en países latinos, sino en Australia y África, por lo que se requiere usar la ecuación que mejor se ajuste a la realidad de la empresa en cuestión.

### 5.10 Diseño y análisis de experimentos

La experimentación es una técnica usada para encontrar el comportamiento de una variable a partir de diferentes combinaciones de factores o variables de entrada al proceso, que al cambiar afectan la respuesta.

El diseño de experimentos es el proceso en que se planea el experimento a realizar, se debe dedicar el tiempo necesario para definir correctamente los aspectos de la experimentación: definir el problema, seleccionar las variables a controlar, los niveles en que se variaran los parámetros, las técnicas estadísticas de análisis que se usará, entre otros. (Montgomery, 2004)

El diseño de experimentos es el primer paso en toda experimentación formal, cuando se han obtenido los datos adecuadamente se deben analizar con métodos estadísticos para obtener conclusiones válidas y objetivas.

### 5.10.1 Conceptos básicos

**Factores:** Son cada una de las variables que se planea controlar, por ejemplo la temperatura, presión, etc. Los factores pueden ser cuantitativos o cualitativos como el tipo de máquina, el operador, el turno de operación.

**Niveles:** Cada uno de los valores en que se piensa variar cada factor, si el factor temperatura se controlará en 60°C y 65°C, se dice que el factor temperatura se variará en dos niveles fijos, si se trata de factores cualitativos como el turno de operación cada turno es un nivel.

**Tratamientos:** Es la combinación de los factores y niveles, si se tiene el factor temperatura en dos niveles, 50 y 60 °C; y el factor presión en dos niveles, 10 y 20 psi. Se tendrá entonces 4 tratamientos diferentes: 50 °C y 10 psi, 50 °C y 20 psi, 60 °C y 10 psi, 60 °C y 20 psi. Cada combinación hecha es un tratamiento

**Replicación o repetición:** Es el número de veces que se hace el experimento en cada condición experimental, es necesario hacer varias replicas para minimizar el error experimental. (Kuehl, 2001)

Gutiérrez y De la Vara, (2008) recomiendan un número de réplicas según el número de factores, resumidos en la Tabla 5.6

**Tabla 5.6** Número de réplicas recomendadas

Diseño	Réplicas recomendadas	Número de corridas
$2^2$	3 ó 4	12,16
$2^3$	2	16
$2^4$	2	16,32
$2^5$	1 ó 2	16,32
$2^6$	Fracción $2^{6-2}$ ó fracción $2^{6-1}$	16,32
$2^7$	Fracción $2^{7-3}$ ó fracción $2^{7-2}$	16,32

Fuente: Gutiérrez y De la Vara, 2008

**Aleatoriedad:** Es el orden en que se realizan las corridas del experimento, la aleatoriedad ayuda a minimizar los efectos por factores que no conocemos o no se incluyeron en el experimento, para esto se puede usar software estadísticos que aleatorizan el experimento.

**Bloqueo:** Es una técnica usada para aumentar la precisión del experimento, se usa cuando se conoce la fuente de variabilidad y se controla.

**Variabes de salida:** Son las variables respuestas del experimento, puede haber una o varias variables respuesta de interés.

### 5.10.2 Pasos para seguir en el diseño de experimentos

1. Definición del problema
2. Selección de los factores y niveles de cada factor
3. Selección de la variable respuesta
4. Determinación del diseño experimental que se llevará a cabo
5. Realización del experimento
6. Análisis de los datos
7. Conclusiones y recomendaciones
8. Estudio de confirmación

Existen diversos modelos de diseño de experimentos, para mencionar algunos: el de bloque aleatorizado, cuadrado latino, grecolatino, pero el más común es el factorial porque permite estudiar el efecto de la interacción entre todos los factores en sus diferentes niveles. (Montgomery, 2004)

### 5.10.3 Diseño factorial

El diseño factorial más pequeño es el que tiene dos factores con dos niveles cada uno, se denota como  $2^2$ , en forma general este tipo de diseños se denota como  $2^k$ , donde k es el número de factores. Así un experimento de tres factores y dos niveles cada uno sería  $2^3 = 8$  tratamientos base. El total de corridas viene dado por  $2^k \cdot n$  donde n es el número de réplicas por cada tratamiento.

### 5.10.4 Procedimiento de análisis para un factorial $2^k$

1. Estimar los efectos de los factores
2. Formar el modelo inicial
3. Realizar las pruebas estadísticas
4. Refinar el modelo
5. Analizar los residuales
6. Interpretar los resultados (Montgomery, 2004)

### 5.10.5 Estimación de los efectos de los factores y su interacción

El efecto de un factor se define como el cambio en respuesta producido por un cambio en el nivel del factor. En algunos experimentos podemos encontrar que la diferencia en respuesta entre los niveles de un factor no es la misma en todos los niveles del otro factor. Cuando esto ocurre se dice que hay interacción entre los factores. Los tres efectos de interés en un experimento factorial son los simples, los principales y los de interacción:

Los efectos simples de un factor son las comparaciones entre los niveles de un factor a un solo nivel de otro.

Los efectos principales de un factor son comparaciones entre los niveles de un factor promediados para todos los niveles de otro factor.

Los efectos de interacción miden las diferencias entre los efectos simples de un factor a diferentes niveles de otro.

$$A = \bar{Y}_{A^+} - \bar{Y}_{A^-}$$

$$A = \frac{1}{4n} [a + ab + ac + abc - (1) - b - c - bc] \quad \text{Ec. 5.12}$$

$$B = \bar{Y}_{B^+} - \bar{Y}_{B^-}$$

$$B = \frac{1}{4n} [b + ab + bc + abc - (1) - a - c - ac] \quad \text{Ec. 5.13}$$

$$C = \bar{Y}_{C^+} - \bar{Y}_{C^-}$$

$$C = \frac{1}{4n} [c + ac + bc + abc - (1) - a - b - ab] \quad \text{Ec. 5.14}$$

$$AB = \frac{1}{4n} [abc - bc + ab - b - ac + c - a + (1)] \quad \text{Ec. 5.15}$$

$$AC = \frac{1}{4n} [(1) - a + b - ab - c + ac - bc + abc] \quad \text{Ec. 5.16}$$

$$BC = \frac{1}{4n} [(1) + a - b - ab - c - ac + bc + abc] \quad \text{Ec. 5.17}$$

$$ABC = \frac{1}{4n} [abc - bc - ac + c - ab + b + a - (1)] \quad \text{Ec. 5.18}$$

Las letras a, b y c son la nomenclatura con que se describe un tratamiento, cuando aparece la letra significa que ese factor está en su valor alto, cuando no aparece significa que está en su valor bajo, cuando se escribe (1) significa que todos los factores están en su valor bajo. Por ejemplo: "a" significa que el factor A está en su valor alto y los factores B y C, en su valor bajo, ab indica que los factores A y B están en su valor alto y el factor C, en su valor bajo; abc indica que los tres factores están en su valor alto.

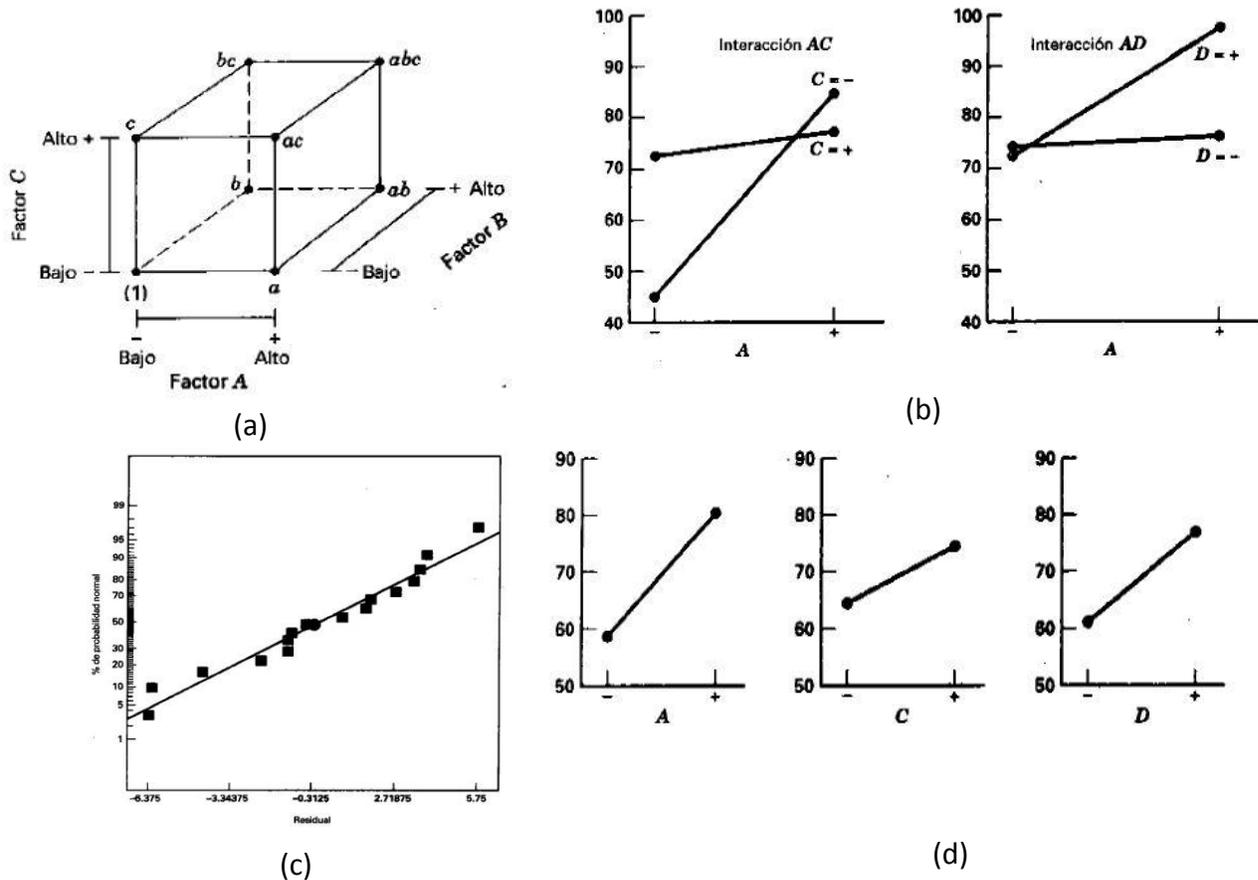
Para obtener el valor de cada uno de los términos de las ecuaciones si suman los resultados de cada réplica, si se hacen cuatro réplicas se deben sumar sus resultados, la variable "n" (número de réplicas) en el denominador promedia su valor.

El término entre corchetes se le llama contraste. La suma de los cuadrados de los efectos se calcula con la Ecuación 5.19. (Montgomery, 2004)

$$SS = \frac{(\text{Contraste})^2}{8n} \quad \text{Ec. 5.19}$$

### 5.10.6 Gráficos útiles para el análisis de incidencia de factores

En la Figura 5.5 se muestran los gráficos más representativos que se usarán para el análisis de los datos del experimento.



**Figura 5.5** Gráficos importantes para el análisis de datos: (a) gráfica de cubos; (b) interacción de efectos principales; (c) distribución normal de probabilidad y (d) efectos principales

**a) Gráfico de cubos:** Este tipo de gráfico se usa cuando se estudian tres factores en cada vértice se ubica un tratamiento diferente, para un diseño de tres factores con dos niveles cada uno resultan ocho tratamientos ( $2^3=8$ ), cada dos lados opuestos del cubo corresponden a los efectos principales (A, B y C en los valores altos y bajos), las diagonales del cubo corresponden a la interacción de dos factores.

En los vértices se colocan los efectos de los tratamientos, de esta manera podemos saber cual tratamiento ejerce mayor efecto sobre la respuesta.

- b) Gráfica de interacción:** La desventaja principal de la estrategia de estudiar un factor a la vez es que no puede tomar en consideración cualquier posible interacción entre los factores, se dice que hay interacción cuando uno de los factores no produce el mismo efecto en la respuesta con niveles diferentes de otro factor. Observe que en la Figura 6.4b, la interacción AC, cuando C está en su valor bajo (C-) se obtiene valores altos de respuesta cuando el factor A está en su valor alto (A+) y respuestas bajas cuando el factor A está en su valor bajo (A-) en cambio para valores altos del factor C (C+) la respuesta no tiene mucha variación sin importar los niveles del factor A.
  
- c) Gráfica de distribución de probabilidad normal:** El gráfico de probabilidad permite comparar la distribución de un conjunto de datos con una distribución especificada, en el caso en que se use una distribución normal el gráfico corresponde a una distribución de probabilidad normal. Los puntos se espera que se distribuyan sobre la recta normal, la distancia de cada punto a la recta es el residual de ese dato, entre más cerca de la recta se encuentren los datos mejor es el ajuste a la distribución normal, esto indica que los datos no están sesgados sino que se distribuyen normalmente.
  
- d) Gráfica de efectos principales:** Permite estudiar el efecto individual de cada factor, es posible que individualmente un factor tenga más peso que otro pero su interacción disminuya el ese efecto. Por eso se estudian en conjunto los efectos individuales y las interacciones.

#### 5.10.7 Análisis de varianza (ANOVA)

El análisis de varianza se utiliza para verificar si hay diferencias estadísticamente significativas entre medias cuando tenemos más de dos muestras o grupos en el mismo planteamiento.

En la Tabla 5.7 se muestra la estructura para realizar un ANOVA para tres factores, en el acápite 5.9.5 se presentaron las ecuaciones para calcular la suma de cuadrados.

Para calcular los cuadrados medios (MS por sus siglas en inglés) se usa la Ecuación 5.20

$$MS = \frac{SS}{GL} \tag{EC. 5.20}$$

Donde SS: Suma de cuadrados y GL son los grados de libertad

El estadístico de prueba Fisher ( $F_o$ ) se calcula con la Ecuación 5.21.

$$F_o = \frac{MS_{tratamiento}}{MS_{error}} \tag{EC. 5.21}$$

**Tabla 5.7:** Análisis de varianza para tres factores

Fuente de Variación	GL	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	$F_o$
<b>A</b>	(a-1)	$SS_A$	$MS_A$	$MS_A / MS_{error}$
<b>B</b>	(b-1)	$SS_B$	$MS_B$	$MS_B / MS_{error}$
<b>C</b>	(c-1)	$SS_C$	$MS_C$	$MS_C / MS_{error}$
<b>AB</b>	(a-1)(b-1)	$SS_{AB}$	$MS_{AB}$	$MS_{AB} / MS_{error}$
<b>AC</b>	(a-1)(c-1)	$SS_{AC}$	$MS_{AC}$	$MS_{AC} / MS_{error}$
<b>BC</b>	(b-1)(c-1)	$SS_{BC}$	$MS_{BC}$	$MS_{BC} / MS_{error}$
<b>ABC</b>	(a-1)(b-1)(c-1)	$SS_{ABC}$	$MS_{ABC}$	$MS_{ABC} / MS_{error}$
<b>Error</b>	abc(n-1)	$SS_{error}$	$MS_{error}$	
<b>Total</b>	abcn-1	$SS_{total}$		

Fuente: Montgomery, 2004

En la tabla a, b y c corresponden a los niveles de cada factor y n es el número de réplicas del experimento.

Cuando el estadístico de prueba es mayor que  $F_\alpha$  con el  $\alpha$  de confianza que se elija (usualmente del 95%), estos valores se encuentran en las tablas de Fisher de cualquier libro de estadística.

Si  $F_o > F_\alpha$  se considera que ese tratamiento es significativo al nivel de confianza elegido, en ocasiones puede ser necesario disminuir el nivel de confianza para que un tratamiento sea significativo. (Montgomery, 2004)

## **VI. Metodología**

Como el estudio propone estudiar la incidencia de las condiciones de operación del cristalizador y las centrífugas de masa C, que reduzcan las pérdidas de sacarosa, se procedió a identificar las condiciones de operación actuales en la empresa, al mismo tiempo se identificaron los puntos de muestreo y los tipos de análisis que se le implementaron a las muestras.

Seguidamente se detallan las etapas implementadas para lograr alcanzar este propósito.

### **6.1 Reconocimiento del proceso y definición de unidad experimental**

#### **6.1.1 Área de estudio**

En el Ingenio Monte Rosa la estación de cristalización y centrífugas cuenta con un sistema de control, el cual permite que el proceso opere de forma estable.

En el cristalizador se controla la corriente eléctrica suministrada al motor del agitador ( $I_m$ ), la cual sirve para mantener la masa cocida en movimiento, usualmente esta tiene un rango de operación de 8 - 9.5 Amperios. La corriente mínima ( $I_m = 8 \text{ A}$ ) se suministra cuando el cristalizador opera con una masa de baja viscosidad (a temperatura alta), mientras la corriente máxima ( $I_m = 9.5 \text{ A}$ ) se aplica cuando se trabaja con una masa de mayor viscosidad (baja temperatura), por lo que se requiere de mayor fuerza para mover la masa. Dado que el proceso cuenta con un sistema de control, el cual permite variar la alimentación de agua fría y la corriente eléctrica suministrada. Cuando la corriente eléctrica suministrada al motor varía, se abre o se cierra la válvula automática del agua usada para enfriar la masa que se está trabajando.

Debido a la gran cantidad de masa que se maneja la respuesta del sistema de control a estos cambios es lenta esto implica que cuando se requiere hacer un cambio en los parámetros, el cambio tarda unos minutos para que la masa cambie sus condiciones y la masa que se centrifuga entre el momento de hacer el cambio y que este tenga efecto no tendrá las condiciones requeridas.

Por otro lado, la carga de masa a la centrífuga se controla con una electroválvula que permite el mayor o menor flujo de masa ( $F_c$ ), esto usualmente responde a las necesidades de espacio en el cristalizador para descargar nuevas templeas, si la carga se maneja en valores bajos (100 amp o menos) permite un mayor tiempo de residencia aumentando así la cristalización de sacarosa, lo que implica mayor agotamiento de la masa porque los cristales tienen más tiempo para que la sacarosa se adhiera a ellos; cuando se aumenta la carga de la centrífuga disminuye el tiempo de residencia y probablemente los cristales de sacarosa sean de menor tamaño debido a que no hubo tiempo de adherir la sacarosa a los cristales.

## **6.2 Determinación de la pureza esperada en miel final durante los primeros meses de la zafra 2011-2012**

Se usó el registro de laboratorio de la empresa para comparar la pureza real con la pureza esperada de la miel final de los primeros meses de la zafra 2011-2012 del ingenio.

Para estudiar las condiciones de agotamiento de la fábrica se usaron los modelos de pureza esperada mediante las Ecuaciones 5.4 a la 5.11. La diferencia entre la pureza esperada y la real proporciona una idea del agotamiento de la miel final, cuanto menor sea la diferencia, mejor es el agotamiento de la miel final.

## **6.3 Implementación del diseño experimental**

La determinación de las condiciones de operación óptimas requirió de la implementación de experimentos confiables, por lo que se planteó un diseño de experimento, que implicó un análisis estadístico, a continuación se describen cada una de las actividades realizadas.

### **6.3.1 Identificación de factores incidentes en las variables de estudio**

La identificación de factores incidentes en la pureza de la miel final (misma que se desea mínima) y en el incremento de pureza en centrifugas (también se desea mínimo) se realizó por medio del siguiente procedimiento:

Para esto, se identificaron los factores que inciden en el incremento de pureza y sus respectivos niveles de la siguiente manera:

- 1) Se realizó un análisis de los procesos de cristalización y centrifugación, para identificar las variables que influyen en la pureza de miel final, así como del sistema de control automático con que cuentan cada uno de los procesos.
- 2) Una vez identificadas las variables se identificaron los factores, considerando la disponibilidad para su medición en el proceso, al mismo tiempo se establecieron los niveles considerando los límites de operación que tienen tanto el cristizador como la centrífuga para los factores identificados.

En el proceso de cristalización los niveles del amperaje del cristizador varían de 8.5 a 9, que corresponden a temperaturas de enfriamiento de 50 a 55 °C (según el sistema de control automático del cristizador), la temperatura de recalentamiento se fijó en esos valores basados en experiencias previas de supervisores y operarios de los equipos, la decisión se basó en la experiencia debido a la falta de un medidor de temperatura de saturación de la masa C en las centrifugas.

La carga de la centrífuga depende principalmente de la capacidad de los equipos, cuanto más rápido se purgue mayor cantidad de miel final se obtiene y más rápido se desalojan los equipos para poder seguir moliendo caña a un ritmo estable, estos valores se fijaron en correspondencia con planes de producción de los tachos.

Por tanto los factores identificados son: La corriente eléctrica suministrada al cristalizador ( $I_m$ , Factor A) en Amperios, la temperatura de recalentamiento de la masa ( $T_m$ , Factor B) en °C y la corriente eléctrica que controla la carga de la centrífuga ( $C_c$ , Factor C), en Amperios. Estos se implementarán en un diseño de experimentos.

### 6.3.2 Determinación de niveles

La Tabla 5.4 del marco teórico (página 19) muestra la tendencia (hasta 1999) de aumentar el límite inferior de enfriamiento de la masa y por consiguiente el de recalentamiento, esto es debido a la calidad de la caña que con los años ha decrecido. Con base en estos antecedentes se definieron 2 niveles por cada factor, según se muestra en la Tabla 6.1.:

**Tabla 6.1:** Niveles de los factores

Factores incidentes	Símbolo	Nivel Bajo	Nivel Alto	Unidades
Corriente eléctrica suministrada al motor del agitador	$I_m$	8.5	9	A
Temperatura de recalentamiento	$T_m$	60	65	°C
Corriente eléctrica que controla la carga de masa en la centrífuga	$C_c$	100	110	A

*Fuente: Elaboración propia*

### 6.3.3 Tratamientos

La determinación del número de experimentos se hizo por medio de un diseño factorial completo con 3 factores y dos niveles por cada factor, lo que resulta en  $2^3 = 8$  tratamientos diferentes

En la Tabla 6.2, A: Corriente eléctrica suministrada al motor del agitador en el cristalizador (Amp), B: Temperatura de recalentamiento (°C) y C: Corriente eléctrica que controla la de masa en la centrifuga (Amp)

**Tabla 6.2:** Tratamientos a desarrollar en el diseño de experimentos

Tratamientos				
N°	A	B	C	Etiquetas
1	8.5	100	60	(1)
2	8.5	100	65	c
3	8.5	110	60	b
4	8.5	110	65	bc
5	9	100	60	a
6	9	100	65	ac
7	9	110	60	ab
8	9	110	65	abc

*Fuente: Elaboración propia*

#### 6.3.4 Variables involucradas

**Variables manipuladas:** Las variables que se manipulan con el propósito de mantener mínimo el valor de pureza de miel final son la temperatura de recalentamiento de la masa, temperatura de enfriamiento en el cristalizador y la carga de masa en la centrifuga.

**Variables controladas:** Las variables que se desea controlar son: Pureza de la miel final (MF) y pureza del Nutsch frío a la salida del cristalizador.

La diferencia de pureza de MF – Pureza de Nutsch frío es el incremento de pureza en la centrifuga, mismo que se desea sea mínimo.

**Variables respuestas:** Las dos variables respuestas son la Pureza de Miel final e incremento de pureza en centrifugas, este incremento resulta de la diferencia de la pureza de la miel final y pureza del Nutsch, ambas purzas se calculan como la relación de

$$\text{Pureza} = \frac{\text{Pol}}{\text{°Brix}} \times 100 \quad \text{Ec. 6.1}$$

#### 6.3.5 Determinación del número de experimentos.

Para estudiar estos parámetros el diseño experimental cuenta con los tres factores identificados en el acápite 6.3.1, siendo estos: la corriente eléctrica suministrada al motor del cristalizador, la temperatura de recalentamiento y la

corriente eléctrica que controla la carga de la centrífuga, cada factor en dos niveles diferentes. Según Kuehl (2001) el número de réplicas está determinado por las capacidades locales del estudio, es decir mayor cantidad de réplicas minimiza el error pero significa mayor costo, Gutiérrez y De la Vara (2008) por otra parte brindan una orientación del número de réplicas basadas en el número de factores, esto se muestra en la Tabla 5.6 del marco teórico (página 24).

Dando como resultado 32 corridas (8 tratamientos con 4 réplicas). Cada corrida está definida por una muestra de miel final y una de Nutsch frío.

## 6.4 Unidad experimental y muestreo

Una vez que se determinó el número de corridas experimentales, se procedió a definir los puntos que faciliten tanto las mediciones de las variables, así como la toma de muestra para su respectivo análisis.

### 6.4.1 Definición de la unidad experimental

El ingenio Monte Rosa cuenta con dos cristalizadores verticales que funcionan en serie y en flujo semi-continuo, la masa de los tachos de tercera se descarga al primer cristalizador por la parte superior, el cual alimenta al cristalizador 2 por la parte inferior. Cuando este está lleno se desborda a una canaleta que alimenta a las centrífugas. Las muestras de Nutsch frío se tomaron cuando la masa sale del segundo cristalizador antes de entrar a la centrífuga. Se cuenta con cuatro centrífugas para masa C (C1, C2, C3 y C4) para bloquear el efecto de la centrífuga se tomaron muestras únicamente de la C4. **Quedando definida la unidad experimental al segundo cristalizador y la centrífuga 4**

Para garantizar la confiabilidad de las mediciones y de los resultados, se garantizó el siguiente control en la unidad experimental:

a) Calibración de los instrumentos de medición y equipos de laboratorio: antes de iniciar las mediciones se calibraron todos los medidores de temperatura y flujos de la unidad experimental. También se aseguró que los equipos de laboratorio estuvieran calibrados, esto se hizo siguiendo el plan de calibración con que cuenta la empresa.

b) Las muestras se tomaron en el orden del diseño planeado y siempre de los equipos seleccionados y con los mismos equipos de laboratorio.

c) Para disminuir el error experimental se realizaron cuatro réplicas por cada tratamiento.

d) Debido a los cambios de turnos que los operarios realizan no se pudo garantizar que el mismo operario sea el involucrado en el experimento, sin

embargo con la ayuda de los supervisores y jefe de área se procuró mantener las condiciones de operación constante: temperaturas, tiempos de residencia, cantidad de miel de lubricación, etc.

#### 6.4.2 Muestreo

Dado que se trabajó con el cristalizador y la centrífuga, se tomó muestras en ambos equipos:

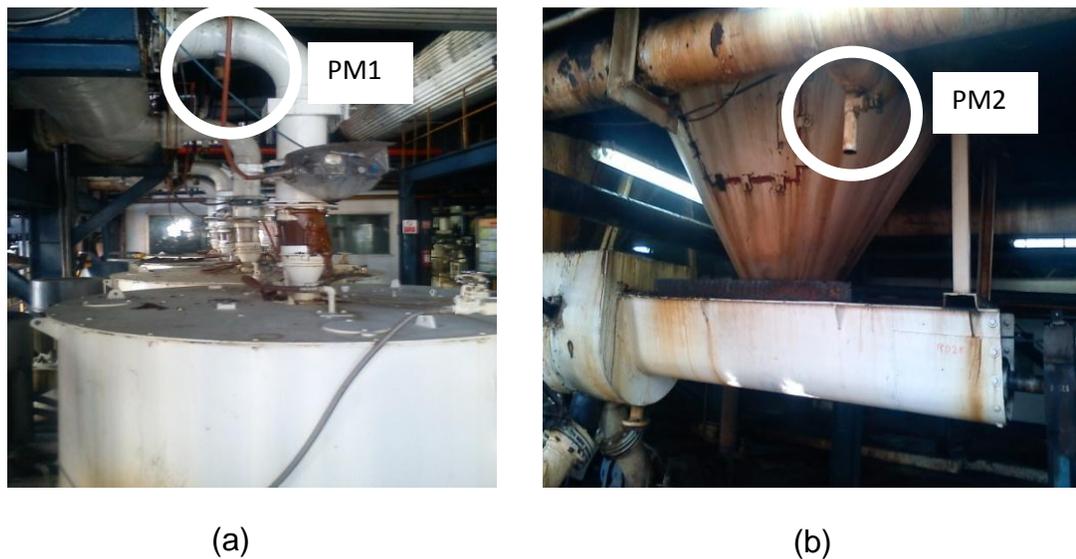
El muestreo del cristalizador las realizó el operario de cristalizadores (por razones de seguridad de la empresa), este muestreo se realizó en el momento que se mantuvieron las condiciones de operación fijadas. Se tomaron un total de 32 (treinta y dos) muestras, cada una compuesta por la par miel final y Nutsch frío al mismo tiempo, y ambas representaron un tratamiento, pudiendo tomarse en cualquier momento del día siempre que las condiciones de operación así lo permitieron.

Para la Centrífuga el muestreo se realizó por la parte inferior de esta, donde se cuenta con una válvula manual que permite sacar la miel final en la centrífuga cuatro, ver Figura 6.1.

Las muestras se tomaron cuando se mantuvieron las condiciones de operación fijadas en el diseño de experimento (ver Tabla 6.2, página 32). Debido a que la válvula tiene material que no corresponde a la muestra deseada se purgó antes de tomar la muestra.

Cada vez que se realizó un muestreo se llevó al laboratorio, de forma inmediata para su respectivo análisis.

En la Figura 6.1 se muestran fotografías de los puntos de muestreo.



**Figura 6.1:** Puntos de muestreo. (a): punto de toma de masa para el Nutsch (PM1), (b): punto de muestreo de miel final (PM2)

### 6.4.3 Métodos de análisis

Las muestras de miel final y de Nutsch frío se analizaron en el laboratorio inmediatamente después de tomarse para evitar que cambie la temperatura y que los azúcares reductores alteren la pureza. Tanto para la miel final como para el Nutsch frío, el análisis realizado fue la pureza aparente, la cual se determina midiendo el °Brix y Pol de la miel y aplicando el método ICUMSA, descritos en el anexo A1

Para medir el grado de agotamiento de la miel final se usaron las ecuaciones de pureza esperada (Ecuaciones 5.4 a la Ecuación 5.8), para verificar cual se ajustó mejor a la realidad de la empresa, lo que brindó una perspectiva de que tanto se está agotando la miel final, entre menor sea la diferencia de pureza esperada y pureza real, mejor será el agotamiento.

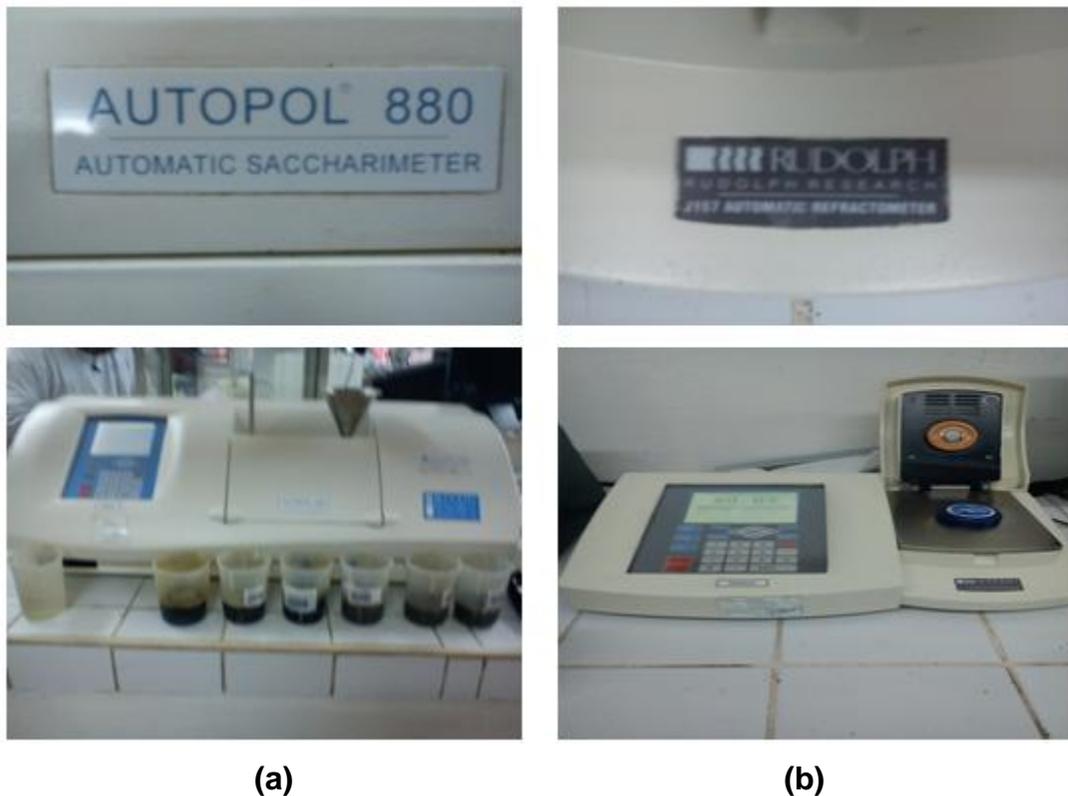


Figura 6.2: Equipos usados en los análisis de productos azucarados, (a): polarímetro y (b): refractómetro.

### 6.5 Procesamiento de datos

El análisis estadístico de los resultados se realizó usando el Software Minitab 16, con el que se estudió el efecto de los factores y su interacción para determinar la mejor combinación de los tratamientos. Se estudió el efecto de cada uno de los factores y la interacción entre ellos para determinar qué factores influyen más en

las variables respuestas, para eso se usaron las Ecuaciones 5.9 a la Ecuación 5.16.

El programa permitió aleatorizar los tratamientos y analizar la interacción de los efectos de los factores mediante gráficas, así como la distribución de probabilidad y el análisis de residuos. Se efectuó un análisis de varianza (de tres factores) para determinar la incidencia e interacción de los factores y determinar cuales tienen mayor influencia en el proceso. Haciendo uso del gráfico de cubos se analizó la mejor combinación de factores. Posteriormente, se discutió cuál es la mejor combinación de parámetros que contribuya a tener una disminución del incremento de la pureza en miel final.

## VII. Presentación y Discusión de Resultados

### 7.1 Reconocimiento de área de estudio

En la primera etapa del estudio se procedió al reconocimiento del área de experimentación en cuestión, esto es el área de cristalización y centrífugas de masa C.

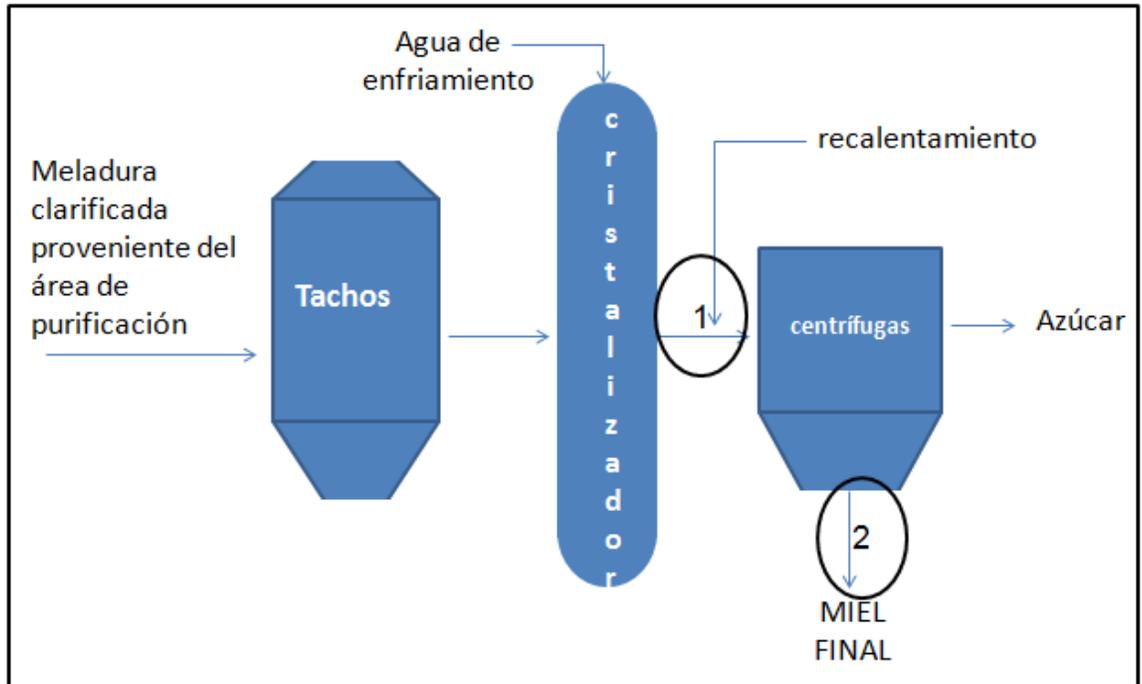
El área de cristalización cuenta con dos cristalizadores verticales por enfriamiento y una batería de centrífugas (grupo de 4 centrífugas continuas en paralelo). El medio de enfriamiento que se usa en los cristalizadores es agua proveniente de una pila de enfriamiento, se usa un sistema de control automático para regular el flujo de agua al cristalizador.

Cuando se requiere enfriar la masa se abre la válvula de agua, lo que provoca que la masa adquiera un estado de sobresaturación y alta viscosidad (hasta el límite mecánico que permita el equipo), cuando la masa está demasiado viscosa se cierra la válvula y la masa comienza a calentarse a medida que nuevas templeas calientes se pasan al cristalizador.

El flujo de masa desde los cristalizadores a las centrífugas es continuo, entre el cristalizador y las centrífugas hay un recalentador que permite elevar la temperatura de la masa, disminuyendo así su viscosidad, en este punto se cuida que el aumento de temperatura no sea superior a la temperatura de saturación de la masa, porque esto provocaría un incremento de pureza debido a la fundición de cristales, el recalentador no tiene acoplado un sistema para medir esta temperatura de saturación, la cual es diferente para cada masa dependiendo de sus características.

No se contó con dicho medidor de temperatura de saturación (la temperatura de operación no es necesariamente la misma que la temperatura de saturación) en el recalentador, para conocer la temperatura de saturación por lo que se necesitó experimentar con dos niveles de temperatura (60 y 65 °C).

En la Figura 7.1 se muestra el esquema de la situación del incremento de pureza de la miel final, donde los puntos 1 y 2 corresponden a los puntos de enfriamiento y recalentamiento de la masa.



**Figura 7.1: Situación del incremento de pureza de la miel final**

### **7.2 Comparación de la pureza real contra la pureza esperada de las mieles finales durante los primeros meses de la zafra 2011-2012**

Para comparar la pureza real contra la pureza esperada basada en los modelos presentados, se contó con los datos de laboratorio de los primeros meses de la zafra, estos se presentan en la Tabla 7.1.

**Tabla 7.1: Comparación de la Pureza real contra las purezas esperadas**

DZ	Pza MF, aparente	Pza Real MF	Pza Real - Aparente	AR Miel final	Cenizas MF	AR /Cenizas	Purezas esperadas				
							Douwes-Decker	SMRI	QSRI	Kelly	Hugot
1	39.40	49.86	10.47	12.18	14.16	0.86	38.59	41.22	41.83	41.22	36.56
2	32.56	48.45	15.89	12.18	14.16	0.86	38.59	41.22	41.83	41.22	36.56
3	43.42	51.38	7.96	12.29	14.35	0.86	38.63	41.26	41.87	41.26	36.57
4	41.77	50.21	8.45	11.70	14.53	0.81	38.73	41.78	42.34	41.77	36.78
5	38.48	48.19	9.72	11.42	15.02	0.76	38.88	42.27	42.79	42.25	36.96
6	36.99	44.45	7.47	13.04	16.90	0.77	39.23	42.15	42.67	42.13	36.91
7	37.11	46.55	9.43	15.99	15.33	1.04	38.59	39.58	40.35	39.67	35.83
8	37.08	47.36	10.27	16.37	14.75	1.11	38.41	39.05	39.86	39.17	35.56
9	36.67	43.53	6.86	15.15	14.82	1.02	38.52	39.75	40.50	39.82	35.91
10	36.45	44.46	8.02	15.29	17.55	0.87	39.22	41.11	41.74	41.12	36.51
11	38.91	46.13	7.22	16.25	15.06	1.08	38.49	39.29	40.08	39.39	35.68
12	34.31	42.73	8.42	16.12	14.98	1.08	38.49	39.32	40.11	39.42	35.70
13	33.61	42.16	8.55	13.82	16.28	0.85	39.01	41.34	41.94	41.33	36.61
14	34.05	43.41	9.36	14.76	14.80	1.00	38.55	39.96	40.69	40.02	36.01
15	34.93	43.41	8.48	14.11	14.15	1.00	38.43	39.96	40.69	40.02	36.01
16	33.37	40.54	7.18	14.93	14.90	1.00	38.56	39.92	40.65	39.98	35.99
17	32.97	41.77	8.80	15.08	15.61	0.97	38.73	40.23	40.93	40.27	36.13
18	33.33	42.86	9.52	15.55	15.99	0.97	38.79	40.18	40.89	40.22	36.11
19	36.01	43.88	7.87	16.55	14.48	1.14	38.32	38.80	39.63	38.94	35.43
20	35.83	46.06	10.22	14.60	16.99	0.86	39.13	41.23	41.84	41.23	36.56
21	37.64	46.63	9.00	15.10	15.84	0.95	38.79	40.35	41.04	40.38	36.19
22	35.62	44.88	9.25	15.10	15.84	0.95	38.79	40.35	41.04	40.38	36.19
23	34.53	44.08	9.55	18.07	14.45	1.25	38.19	38.04	38.94	38.25	35.00

24	34.66	47.35	12.70	16.65	16.87	0.99	38.94	40.05	40.77	40.10	36.05
25	35.22	42.89	7.67	15.39	16.23	0.95	38.87	40.39	41.08	40.43	36.21
26	33.74	42.59	8.85	16.01	14.76	1.08	38.44	39.25	40.04	39.35	35.66
27	35.63	44.77	9.14	14.11	17.96	0.79	39.42	41.99	42.54	41.98	36.86
28	35.44	43.04	7.61	13.72	17.17	0.80	39.25	41.85	42.40	41.84	36.80
29	33.98	43.25	9.27	14.54	18.02	0.81	39.40	41.76	42.32	41.75	36.77
30	33.99	46.36	12.36	13.72	17.81	0.77	39.42	42.16	42.69	42.15	36.92
31	34.53	42.68	8.14	13.79	14.74	0.94	38.61	40.50	41.18	40.53	36.26
32	34.59	41.94	7.35	14.08	16.86	0.84	39.14	41.47	42.06	41.47	36.66
33	34.07	44.45	10.38	16.39	15.61	1.05	38.63	39.52	40.29	39.61	35.80
34	33.93	44.61	10.68	16.34	15.38	1.06	38.57	39.42	40.20	39.52	35.75
35	34.19	46.09	11.90	15.75	15.78	1.00	38.72	39.96	40.68	40.01	36.01
36	34.04	42.01	7.97	14.89	15.11	0.99	38.62	40.06	40.78	40.12	36.06
37	33.64	44.09	10.45	15.37	15.43	1.00	38.66	39.97	40.70	40.03	36.02
38	32.70	42.51	9.81	15.36	15.46	0.99	38.67	39.99	40.72	40.05	36.02
39	31.81	43.82	12.01	15.22	15.33	0.99	38.65	40.00	40.73	40.06	36.03
40	31.92	42.04	10.12	12.20	16.47	0.74	39.19	42.49	42.99	42.47	37.04
41	33.37	43.80	10.43	11.92	17.08	0.70	39.37	43.00	43.45	42.98	37.21
42	35.12	46.97	11.84	14.76	17.92	0.82	39.36	41.59	42.17	41.58	36.71
43	33.67	44.14	10.46	15.00	16.77	0.89	39.04	40.89	41.53	40.90	36.42
44	33.04	43.16	10.12	17.69	17.54	1.01	39.02	39.87	40.60	39.93	35.96
45	33.15	44.42	11.26	16.23	16.32	0.99	38.82	39.99	40.71	40.04	36.02
46	32.97	44.60	11.64	15.91	17.55	0.91	39.17	40.77	41.43	40.79	36.37
47	33.05	47.05	14.00	15.71	15.47	1.02	38.65	39.81	40.55	39.88	35.94
48	33.58	45.96	12.38	15.80	14.22	1.11	38.31	39.05	39.86	39.17	35.56
49	33.83	46.55	12.72	16.06	14.53	1.11	38.37	39.09	39.90	39.21	35.58
50	34.14	45.88	11.74	16.23	13.23	1.23	38.02	38.20	39.09	38.40	35.09

51	32.49	44.88	12.39	16.29	15.51	1.05	38.61	39.53	40.29	39.61	35.80
52	33.60	47.37	13.77	14.98	16.24	0.92	38.91	40.63	41.29	40.65	36.31
53	35.35	45.06	9.71	15.23	14.25	1.07	38.37	39.37	40.15	39.47	35.72
54	34.71	45.34	10.63	12.38	14.30	0.87	38.61	41.17	41.79	41.17	36.54
55	34.40	46.59	12.19	15.20	15.58	0.98	38.72	40.15	40.86	40.20	36.10
56	32.94	44.45	11.51	16.44	15.88	1.04	38.69	39.64	40.40	39.72	35.86
57	33.15	44.02	10.87	16.06	14.33	1.12	38.32	38.97	39.78	39.09	35.51
58	31.87	43.60	11.73	15.91	14.93	1.07	38.49	39.40	40.18	39.50	35.74
59	32.20	43.02	10.82	15.71	15.05	1.04	38.54	39.58	40.34	39.66	35.83
60	32.78	43.22	10.44	15.45	15.36	1.01	38.64	39.89	40.62	39.95	35.98
61	33.13	39.91	6.78	12.55	15.33	0.82	38.87	41.64	42.22	41.63	36.73
62	33.14	40.54	7.40	15.96	15.33	1.04	38.59	39.60	40.36	39.68	35.84
63	32.80	41.21	8.41	15.07	15.60	0.97	38.73	40.23	40.94	40.28	36.14
64	32.74	42.26	9.52	16.17	15.39	1.05	38.59	39.52	40.29	39.61	35.80
65	32.68	40.99	8.31	15.95	16.85	0.95	38.99	40.41	41.09	40.44	36.21
66	32.10	40.86	8.75	16.50	15.81	1.04	38.67	39.58	40.34	39.66	35.83
67	31.92	39.43	7.51	16.40	14.33	1.14	38.29	38.79	39.63	38.94	35.42
68	31.81	39.89	8.08	14.14	13.86	1.02	38.35	39.77	40.52	39.84	35.92
69	31.21	39.79	8.58	14.96	15.35	0.97	38.67	40.16	40.87	40.20	36.10
70	32.74	40.33	7.59	16.34	14.38	1.14	38.31	38.85	39.68	38.99	35.45
71	32.88	41.86	8.98	16.11	14.59	1.10	38.38	39.10	39.90	39.21	35.58
72	31.18	43.22	12.04	15.96	14.65	1.09	38.41	39.21	40.01	39.32	35.64
73	31.74	42.78	11.04	16.33	15.96	1.02	38.72	39.74	40.49	39.82	35.91
74	31.47	41.22	9.75	15.66	13.32	1.18	38.09	38.56	39.42	38.73	35.30
75	33.72	40.61	6.88	15.00	12.95	1.16	38.05	38.69	39.53	38.84	35.37
76	33.63	42.13	8.50	12.33	13.95	0.88	38.52	40.99	41.63	41.00	36.47
77	32.94	44.22	11.28	15.86	14.95	1.06	38.50	39.44	40.21	39.53	35.76

78	33.83	44.45	10.62	15.07	14.88	1.01	38.54	39.83	40.57	39.90	35.95
79	33.38	46.75	13.37	16.28	15.17	1.07	38.52	39.34	40.13	39.44	35.71
80	32.14	40.04	7.90	16.84	13.65	1.23	38.08	38.15	39.05	38.35	35.07
81	31.94	39.98	8.04	16.24	13.94	1.17	38.20	38.64	39.49	38.80	35.34
82	33.32	42.34	9.02	15.01	13.12	1.14	38.09	38.80	39.63	38.94	35.42
83	32.78	40.06	7.28	15.09	13.00	1.16	38.05	38.67	39.52	38.82	35.36
84	34.12	41.34	7.22	15.65	13.21	1.18	38.06	38.50	39.36	38.67	35.26
85	33.41	39.44	6.03	12.41	12.84	0.97	38.23	40.23	40.93	40.27	36.13
86	33.50	40.49	6.99	15.08	13.27	1.14	38.12	38.85	39.68	38.99	35.45

Fuente: Laboratorio Ingenio Monte Rosa, 2012

La pureza de la miel final es un indicador del grado de agotabilidad de la misma, la meta es lograr que su pureza sea tan baja como sea factiblemente económica, es decir aunque la tecnología permita continuar agotando la masa al usar la miel final para nuevas templeas, en términos económicos se ha demostrado que no es factible. Es común que la pureza esperada no se alcance y se crea una diferencia entre esta y la pureza real, la meta es reducir esta diferencia. (Chen, 2000)

En la Figura 7.2 se presenta el comportamiento de la pureza real de la miel final (según datos del historial de laboratorio suministrados por la empresa) y las puranzas determinadas mediante las ecuaciones de los modelos de pureza esperada (Ecuaciones 5.6 a la 5.11 del marco teórico).

En la gráfica, la línea azul representa la pureza real y las demás corresponden a los modelos de pureza esperada, la línea que más se acerca a la pureza real es la que corresponde al modelo presentado por Queensland Sugar Reseach Institute (Ecuación 5.9 del marco teórico).

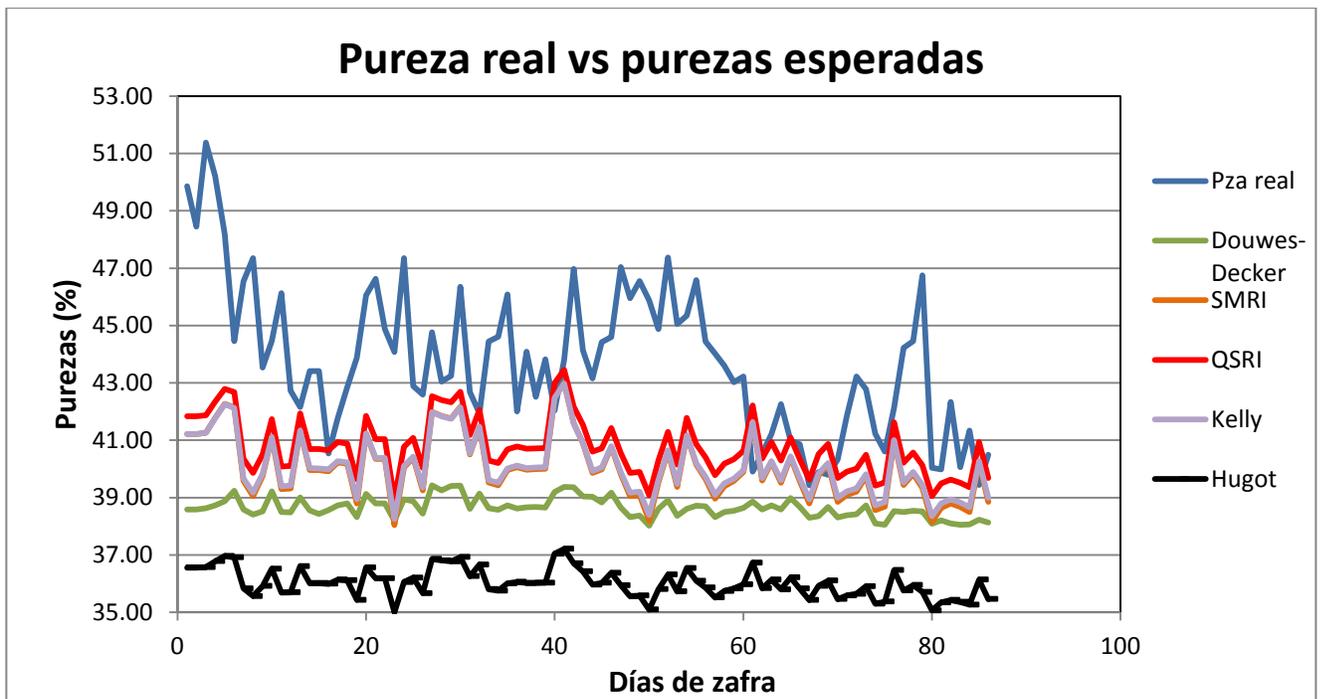


Figura 7.2: Pureza real vs pureza esperada de la miel final

**Tabla 7.2:** Medidas de tendencia central y variabilidad para los modelos de pureza esperada

Estadístico	Pureza Real	Douwes-Decker	SMRI	QSRI	Kelly	Hugot
Varianza	6.75	0.12	1.20	0.99	1.08	0.25
Media	<b>43.76</b>	38.65	40.06	<b>40.78</b>	40.13	36.02
Desviación estándar	2.60	0.35	1.10	1.00	1.04	0.50

Fuente: Elaboración propia

Lo que se quiere mostrar es que existe una diferencia entre la pureza real y la pureza esperada, sin importar el modelo, en la Tabla 7.2 se muestra esta diferencia.

Cuando se aplica el modelo QSRI, se obtiene un mejor acercamiento a la situación de la empresa, alcanzándose un promedio en la diferencia Pureza real - Pureza esperada de 3 puntos, esta pureza es la pureza real y no debe confundirse con la pureza aparente que se usa en los análisis rápidos de laboratorio.

### 7.3 Análisis de resultados del diseño de experimentos

En el diseño de experimentos se planteó analizar en el laboratorio muestras de Nutsch frío y miel final, las Figuras 7.3 y 7.4 son muestras de Nutsch frío y miel final respectivamente.



**Figura 7.3:** Filtrado de Nutsch frío



**Figura 7.4 : Filtrado de miel final**

El resultado de las treinta y dos muestras se presenta en la Tabla 7.3.

**Tabla 7.3: Resultados del Diseño de experimentos**

Donde A: Amperaje del cristizador (A), B: Temperatura de recalentamiento en las centrifugas (°C) y C es la carga de las centrifugas(A)

N°	A	B	C	Pol Nutsch	°Brix Nutsch	Pza Nutsch	Pol MF	°Brix MF	Pza MF	Incremento de Pza	Etiquetas
1	8.5	60	110	24.95	95.88	26.02	27.98	81.42	34.37	8.35	c
2	9	65	110	24.90	94.00	26.49	26.84	85.50	31.39	4.90	abc
3	8.5	65	110	24.02	95.42	25.18	25.21	82.84	30.43	5.26	bc
4	9	60	100	26.13	94.22	27.73	30.09	88.84	33.87	6.14	a
5	9	60	100	26.73	94.04	28.42	27.41	84.32	32.51	4.09	a
6	9	65	100	23.98	93.92	25.53	26.75	82.38	32.47	6.94	ab
7	9	60	110	24.60	95.12	25.86	28.16	80.86	34.83	8.97	ac
8	8.5	65	100	27.10	96.68	28.03	26.70	78.80	33.88	5.85	b
9	8.5	65	110	27.50	95.70	28.74	27.50	80.62	34.11	5.38	bc
10	9	60	110	25.74	93.14	27.64	26.36	85.76	30.73	3.10	ac
11	8.5	60	110	24.82	94.14	26.36	27.59	83.68	32.97	6.61	c
12	9	60	110	26.14	93.56	27.94	28.16	83.00	33.93	5.99	ac
13	9	65	100	25.83	93.96	27.49	26.58	84.56	31.43	3.94	ab
14	8.5	60	100	23.14	88.78	26.07	26.58	88.50	30.03	3.96	1
15	9	65	110	26.00	93.94	27.68	30.36	83.10	36.53	8.86	abc
16	9	60	100	25.52	94.98	26.87	25.08	84.04	29.84	2.97	a
17	8.5	60	110	22.75	92.96	24.47	25.08	82.00	30.59	6.11	c
18	8.5	60	100	23.80	86.84	27.41	27.19	85.92	31.65	4.24	1
19	8.5	65	110	27.81	94.92	29.30	28.16	88.12	31.96	2.66	bc
20	9	65	100	27.28	94.60	28.84	30.66	82.12	37.34	8.50	ab
21	8.5	60	100	25.57	94.98	26.92	28.56	83.54	34.18	7.26	1
22	8.5	65	110	26.09	93.12	28.02	29.48	82.80	35.60	7.59	bc
23	9	60	100	25.52	94.34	27.05	26.71	83.24	32.09	5.03	a
24	9	60	110	26.53	94.24	28.15	29.17	83.74	34.83	6.68	ac
25	8.5	65	100	25.87	94.84	27.28	26.66	85.04	31.35	4.07	b
26	9	65	110	24.99	92.90	26.90	27.72	83.92	33.03	6.13	abc
27	8.5	65	100	25.52	94.06	27.13	26.05	83.56	31.17	4.04	b
28	8.5	65	100	23.89	93.88	25.45	26.27	83.02	31.64	6.20	b
29	9	65	110	25.78	93.44	27.59	25.78	81.52	31.63	4.03	abc
30	8.5	60	100	25.92	94.84	27.33	27.85	82.62	33.71	6.38	1
31	8.5	60	110	23.28	94.20	24.71	25.70	82.10	31.30	6.59	c
32	9	65	100	25.30	93.36	27.10	30.62	83.36	36.74	9.64	ab

Fuente: Elaboración propia

Los resultados se discuten en concordancia con el objetivo de estudiar la incidencia de los tres factores sobre el incremento de pureza de la miel final, se analizaron los efectos principales individualmente, sus interacciones, residuos, efectos estandarizados, se mostraron los resultados en una gráfica de cubos y se realizó el ANOVA correspondiente, en conjunto se concluirá si existe incidencia y que factores afecta más para trabajar en función de estos.

### **7.3.1 Efectos principales para el incremento de pureza**

Los efectos principales sobre el incremento de pureza de miel final provocados por los factores estudiados: Corriente eléctrica suministrada al motor del agitador en el cristizador (A), temperatura de recalentamiento (B) y la corriente eléctrica que controla la carga de la centrífuga (C), se muestran en la Figura 7.5. En ésta se refleja que todos los factores inciden en el incremento de pureza, ya que todas presentan pendientes y distintas. Nótese que la pendiente de la línea correspondiente al factor B tiene una pendiente menor que las los factores A y C, indicando así que estos presentan mayor incidencia en el incremento de pureza.

En la Tabla 7.4 se muestran los valores del incremento de pureza de la miel final alcanzado por el cambio del nivel bajo al alto de los factores. El factor C incrementa la pureza en 0.5, seguido del factor A en 0.34, y el factor B en 0.1 con menor incidencia. Por tanto, si se desea una miel final con menor pureza los resultados reflejan que es mejor trabajar los factores en un nivel bajo; factor A (8.5 A), factor B (60 °C) y Factor C (100 A).

Lo anterior significa mantener caliente la masa cocida en el cristizador, no exceder el recalentamiento (lo que permite no fundir los cristales de sacarosa) y centrifugar a una tasa baja, esto es difícil de mantener cuando se tiene que desalojar rápidamente la masa del cristizador por razones de espacio y cuando el clima frío dificulta calentar la masa, ya que el agua de enfriamiento se aclimata al aire libre y si el clima es cálido el agua se mantiene a una temperatura mayor que con clima frío, facilitando mantener caliente la masa cocida y por consiguiente poco viscosa facilitando la difusión de los cristales de sacarosa.

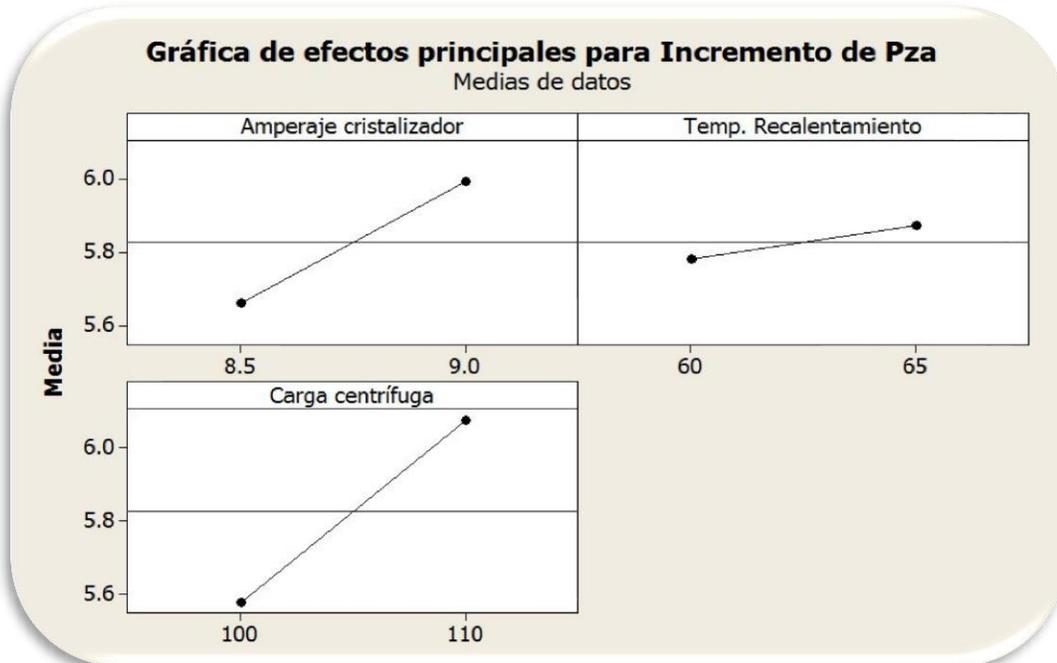


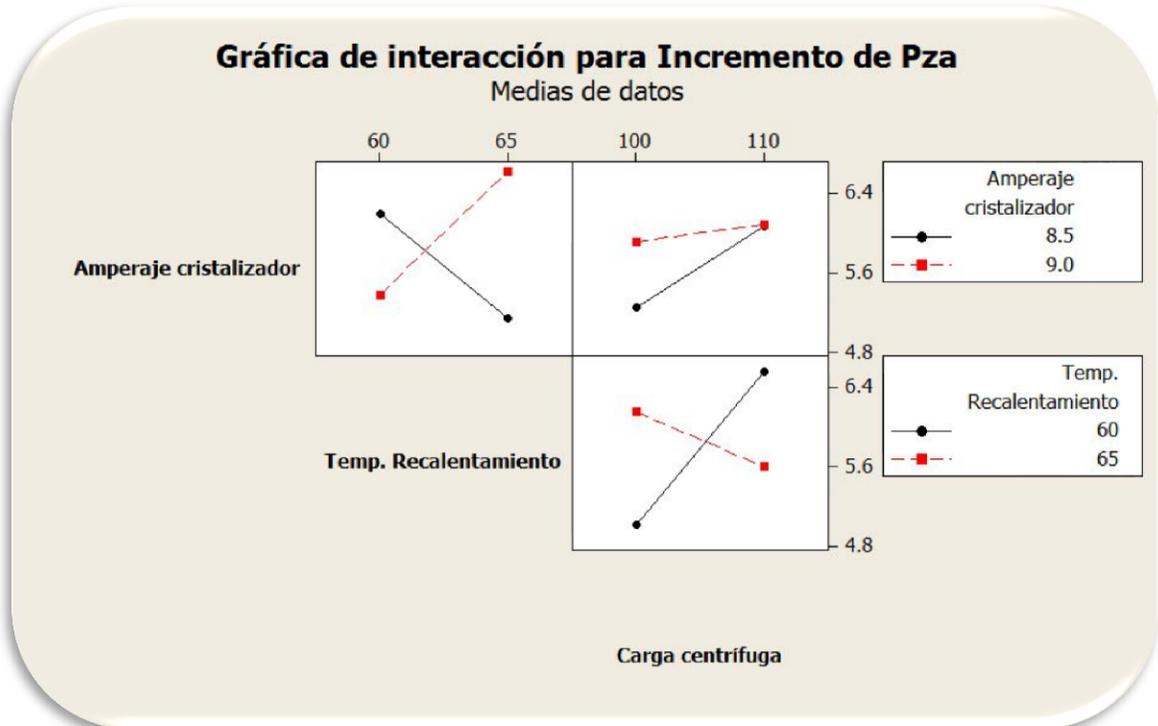
Figura 7.5: Gráfica de efectos principales para el incremento de pureza de la miel final

Tabla 7.4: Efecto de los factores principales

Factor	Incremento de Pza
A	0.34
B	0.10
C	0.50

### 7.3.2 Interacción de los factores para el incremento de pureza

Anteriormente se discutió el efecto de los factores principales, ahora se discutirá el efecto de interacción entre ellos.



**Figura 7.6:** Gráfica de interacción para el incremento de pureza de la miel final

En la Figura 7.6 se muestra la interacción de los factores para el incremento de pureza. AB (cuadro superior izquierdo), AC (cuadro superior derecho) y BC (cuadro inferior)

**Interacción AB:** Cuando A (amperaje del cristalizador) está en su nivel bajo (8.5 A), el incremento de pureza está influenciado por B (temperatura de recalentamiento), estando A en su nivel bajo al mover B de su nivel bajo (60 °C) a su nivel alto (65 °C) el incremento de pureza disminuye, así que si se mantiene A en su nivel bajo (8.5 A) conviene recalentar la masa hasta 65 °C; cuando analizamos A en su nivel alto (9 A) se aprecia que al pasar B de su nivel bajo a su nivel alto, el incremento de pureza aumenta.

Cuando se varíe una condición de operación se debe considerar las demás condiciones de operación que interactúan, nótese que 8.5 A implica una temperatura de la masa en el cristalizador mayor que para 9 A, esto significa que existe un gradiente de temperatura en el que es posible enfriar y recalentar la masa para minimizar el incremento de pureza, 8.5 A corresponde (de acuerdo al sistema de control) aproximadamente a 55°C y 9 A corresponden a 50°C, dando un gradiente de aproximadamente 10 °C.

Esto confirma el análisis de efectos principales donde 8.5 A fue la mejor opción, aunque como efecto principal 60 °C era mejor con respecto a la temperatura de recalentamiento, cuando interactúa con el amperaje resulta mejor mantenerla en 65 °C, recuérdese que entre el amperaje y la temperatura de recalentamiento el amperaje es más incidente.

**Tabla 7.5: Interrelación del factor A y B para minimizar el incremento de pureza de miel final**

Corriente eléctrica del motor del agitador en el cristalizador(A)	Temperatura correspondiente (°C)	Temperatura de recalentamiento (°C)
8.5	55	65
9	50	60

*Fuente: Elaboración propia*

De lo discutido arriba se evidencia lo siguiente:

- ✓ Si se mantiene el amperaje del cristalizador en 8.5 A se debe enfriar la masa hasta 65°C.
- ✓ Si se mantiene el amperaje del cristalizador en 9 A se debe enfriar la masa hasta 60°C.
- ✓ Se permite un recalentamiento de aproximadamente 10 °C.
- ✓ El menor incremento se evidencia en el punto más bajo que corresponde a un amperaje de 8.5 A con temperatura de recalentamiento de 65 °C.

**Interacción AC:** De la Figura 7.6 se nota que si se mantiene A en su nivel bajo (8.5 A) se obtiene un incremento de pureza menor cuando se centrifuga a una carga que corresponda a 100 A que a 110 A, sucede similar cuando se mantiene A en su nivel alto (9 A) que es conveniente centrifugar en un nivel bajo (100 A). Así que sin importar el nivel en que se mantenga el cristalizador conviene centrifugar a una carga que corresponda a 100 A, esto corresponde al efecto individual de los factores donde convenía centrifugar a una carga correspondiente a 100 A.

Se evidencia que la mejor interacción del factor A y C para minimizar el incremento de pureza se da cuando el cristalizador se mantiene en un amperaje de 8.5 A y se centrifuga a una carga correspondiente de 100 A.

**Interacción BC:** Cuando se analiza la interacción de la temperatura de recalentamiento y la carga de centrifuga, se tiene que, si se recalienta la masa hasta 60 °C conviene centrifugar a una carga correspondiente de 100 A, mientras que si se aumenta la carga en las centrifugas correspondiente a 110 A

el incremento de pureza sube de 5 a 6.5 aproximadamente; si se recalienta la masa hasta 65 °C el incremento de pureza es menor cuando se centrifuga a una carga de 110 A, aunque sigue siendo menor el incremento al centrifugar a una carga de 100 A y recalentamiento de 60 °C.

Cuando se analizaron los factores individualmente, y luego se analizó su interacción de dos factores a la vez resultó que el incremento de pureza es menor al mantener las condiciones de operación en los valores bajos de los factores esto es: Amperaje del cristizador 8.5 A, Temperatura de recalentamiento 60 °C y Carga de la centrifuga 100 A.

La Tabla 7.6 muestra el valor numérico del peso de los efectos de cada factor individualmente e interactuando con los demás.

**Tabla 7.6: Efecto de los factores para el incremento de pureza de la miel final**

<b>Factor</b>	<b>Incremento de Pza</b>
<b>A</b>	0.34
<b>B</b>	0.10
<b>C</b>	0.50
<b>AB</b>	1.15
<b>AC</b>	-0.32
<b>BC</b>	-1.04
<b>ABC</b>	-0.41

De la Tabla 7.5 se puede apreciar que la interacción AB es la de mayor incidencia, seguida por la interacción BC y el factor principal C, las demás son menos incidentes.

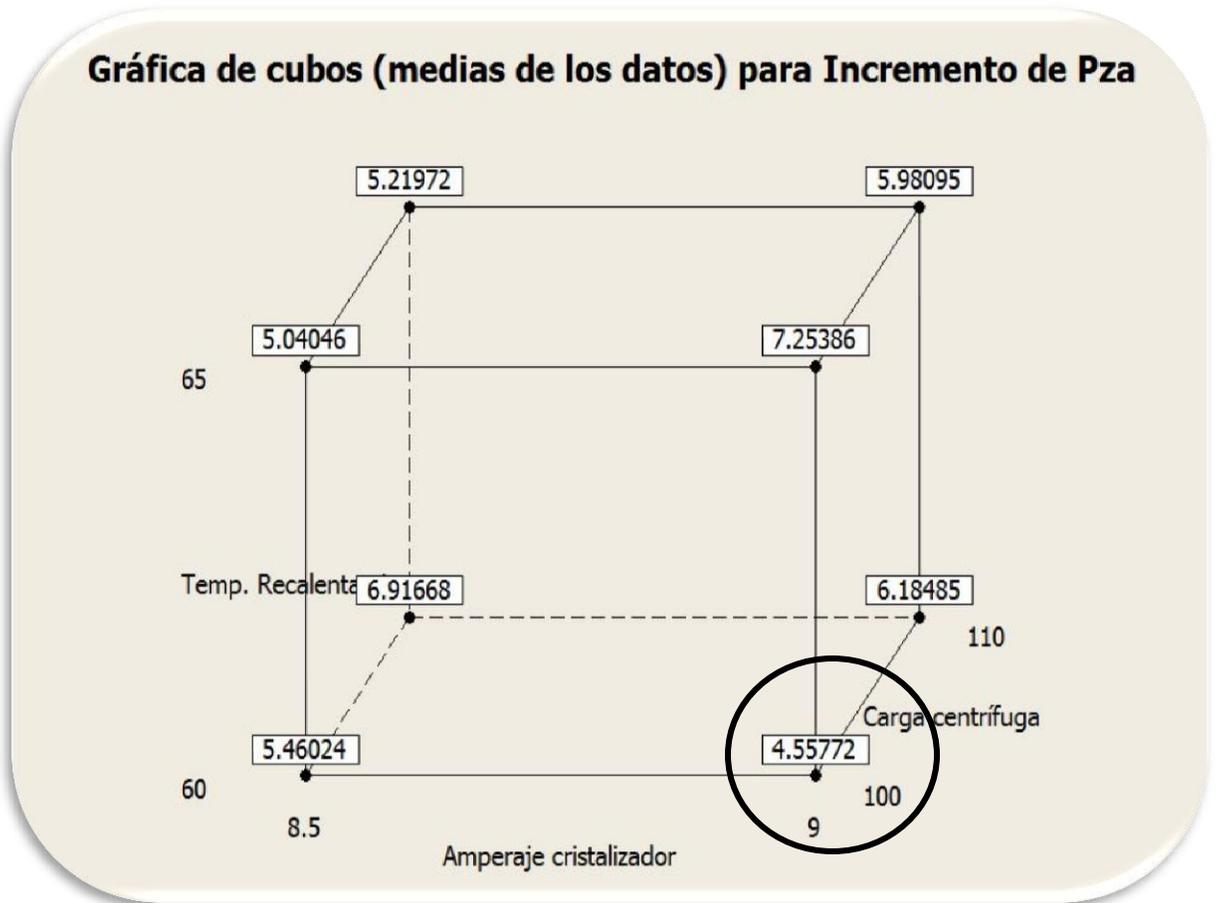
Los signos indican la dirección del efecto, en el caso de los signos positivos cuando se pasan de trabajar de niveles bajos a niveles altos la respuesta aumenta, es decir el incremento es mayor; nos interesa que el incremento sea mínimo por eso conviene trabajar en niveles bajos de los factores.

### **7.3.3 Gráficas de cubo para el incremento de pureza y miel final**

Con la gráfica de cubos se puede visualizar las respuestas en un cubo, en el que cada tratamiento se ubica en una esquina del mismo.

En las gráficas de interacción se mostró la interacción de dos factores a la vez, sin ver la influencia del tercero, en esta gráfica de cubos se puede apreciar como varía la respuesta con los tres factores a la vez.

En la Figura 7.7 se muestra el gráfico de cubos para el incremento de pureza.



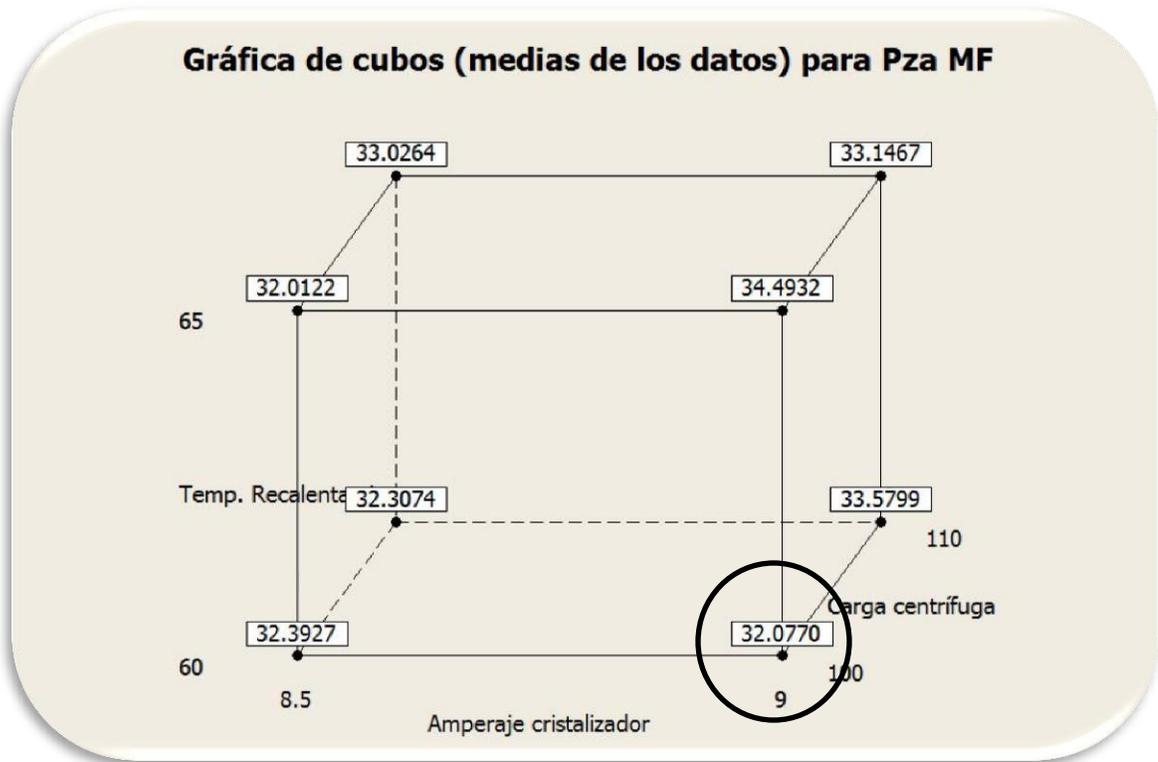
**Figura 7.7:** Gráfica de cubos para el incremento de pureza

En la Figura 7.7 el tratamiento que presenta el menor incremento de pureza corresponde al amperaje en su nivel alto y la temperatura de recalentamiento y carga de centrifuga en sus niveles bajos. Aunque esto tiene cierta congruencia con los análisis anteriores.

En las interacciones AB y AC se notó que cuando se trabaja un amperaje de 9 A conviene recalentar hasta 60 °C y centrifugar a 100 A respectivamente. Los efectos principales indicaban que conviene mantener los factores en sus niveles bajos, en el cubo se evidencia esto excepto por el amperaje que parece

convenir mantenerlo en 9 A, pero su incidencia era menor que para la carga de centrífuga.

De nada sirve minimizar el incremento de pureza si esto implica que la pureza de la miel final sea alta, así que para garantizar esto analizaremos con una gráfica de cubo la pureza de miel final en la Figura 7.8.

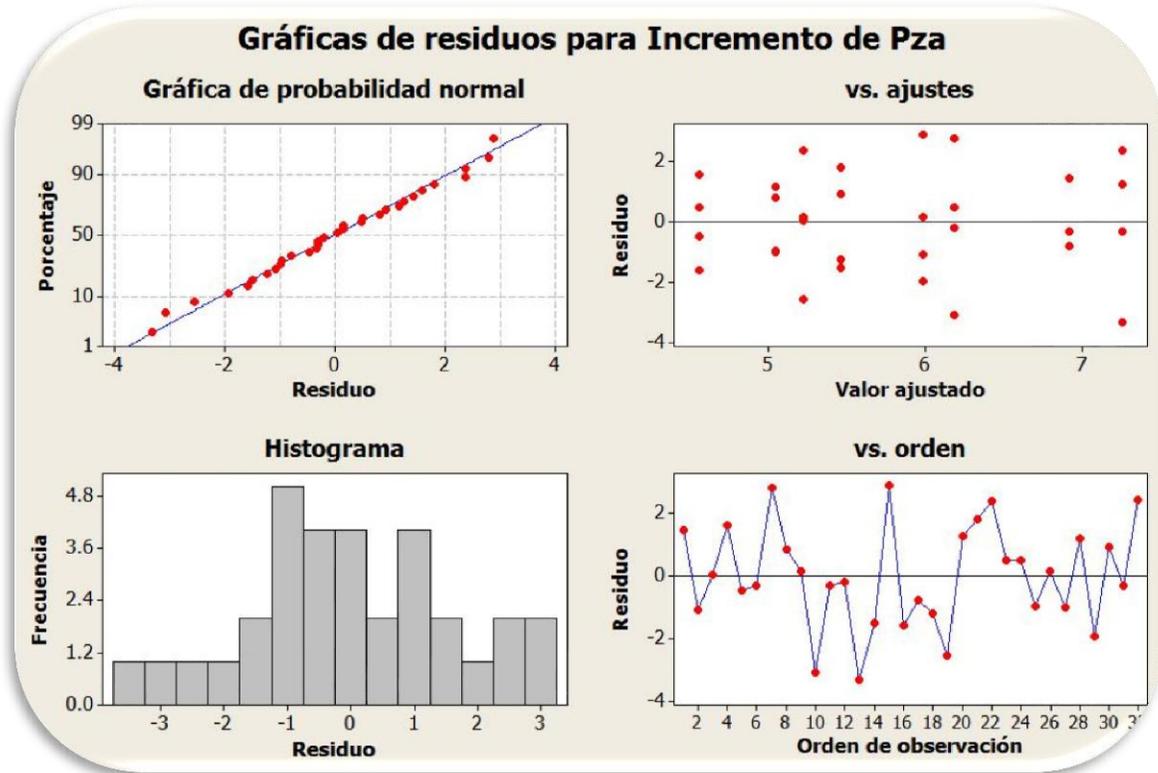


**Figura 7.8:** Gráfica de cubos para Pureza de Miel Final

Para el incremento de pureza el tratamiento que menor resultó es **9 A- 60°C – 100 A**, con este tratamiento se obtiene una pureza de miel final de 32 puntos, así que podemos decir que este es el tratamiento más adecuado.

### 7.3.4 Análisis de residuos para el incremento de pureza

Los residuos son la diferencia entre un valor puntual y el promedio de la muestra, la Figura 7.9 muestra las principales gráficas de residuos para el incremento de pureza.



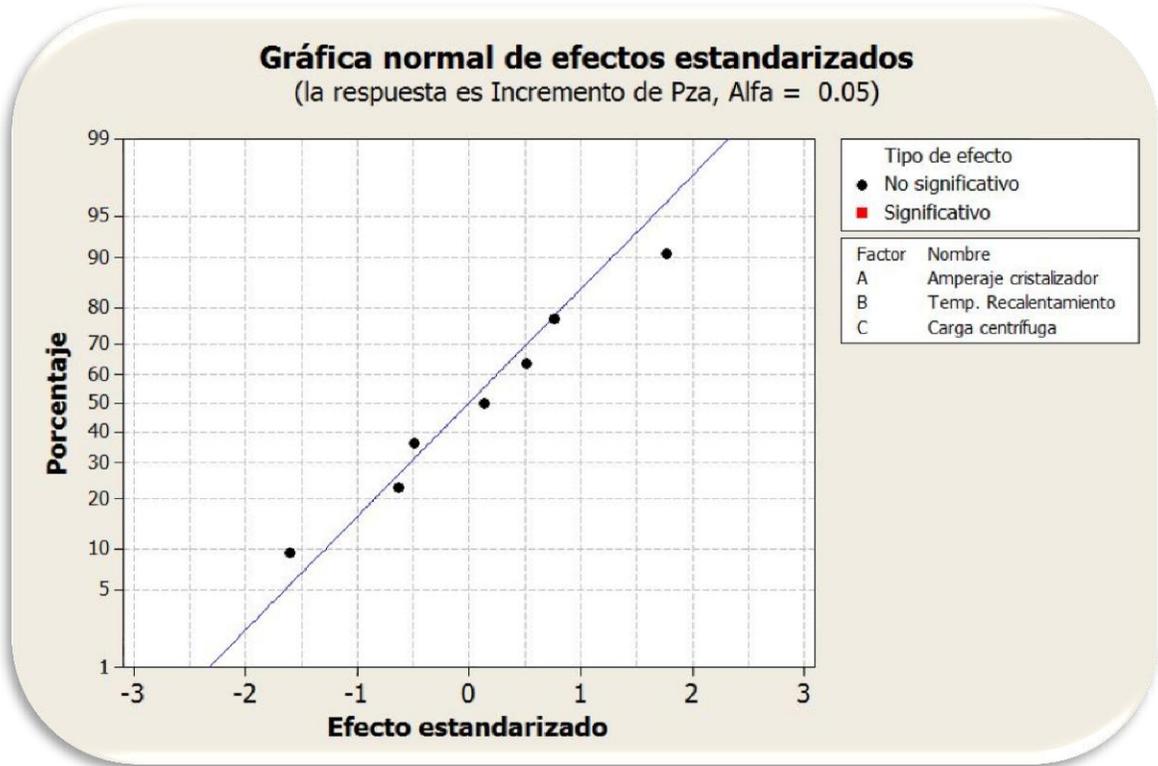
**Figura 7.9:** Gráficas de residuos para el incremento de pureza de la miel final

En la Figura 7.9 se evidencia que:

- ✓ Los datos se distribuyen normalmente alrededor de la gráfica de probabilidad normal.
- ✓ Los datos se distribuyen aleatoriamente con residuos altos, es decir que se alejan del valor central, pero la aleatoriedad garantiza que los datos no están sesgados por lo que las conclusiones inferidas a partir de ellos sean adecuadas.
- ✓ Los residuos en el histograma se asimilan, sin valores atípicos, y considerando la gráfica de probabilidad normal, se puede decir que los datos son normales.
- ✓ En el gráfico de las observaciones se ve que los datos están dispersos aleatoriamente, pero el valor de los residuos presenta un rango grande, por lo que se debe investigar si hay otros factores que incidan en el proceso que causen estos residuos.

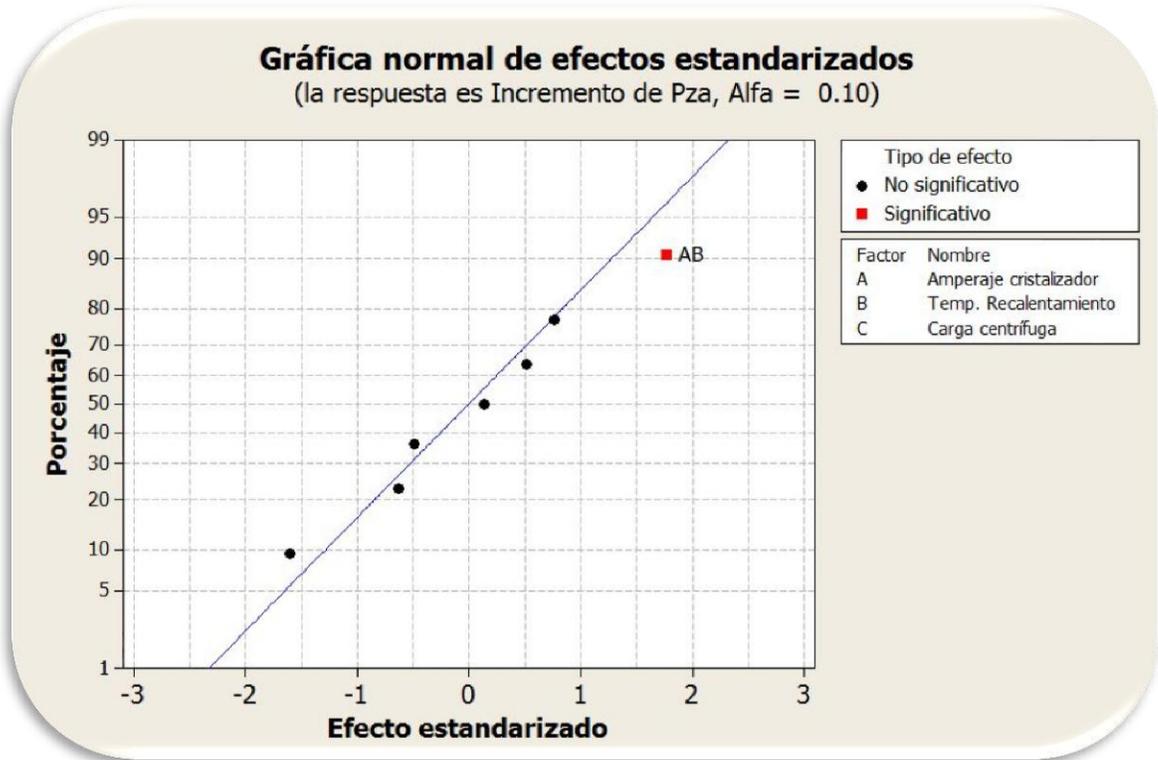
### 7.3.5 Efectos estandarizados para el incremento de pureza

Con la gráfica de efectos estandarizados se pretende estudiar qué factores son más incidentes y con qué nivel de confianza, la Figura 7.10 muestra los efectos estandarizados con un  $\alpha = 0.05$



**Figura 7.10:** Gráfica de efectos estandarizados al 95% confianza

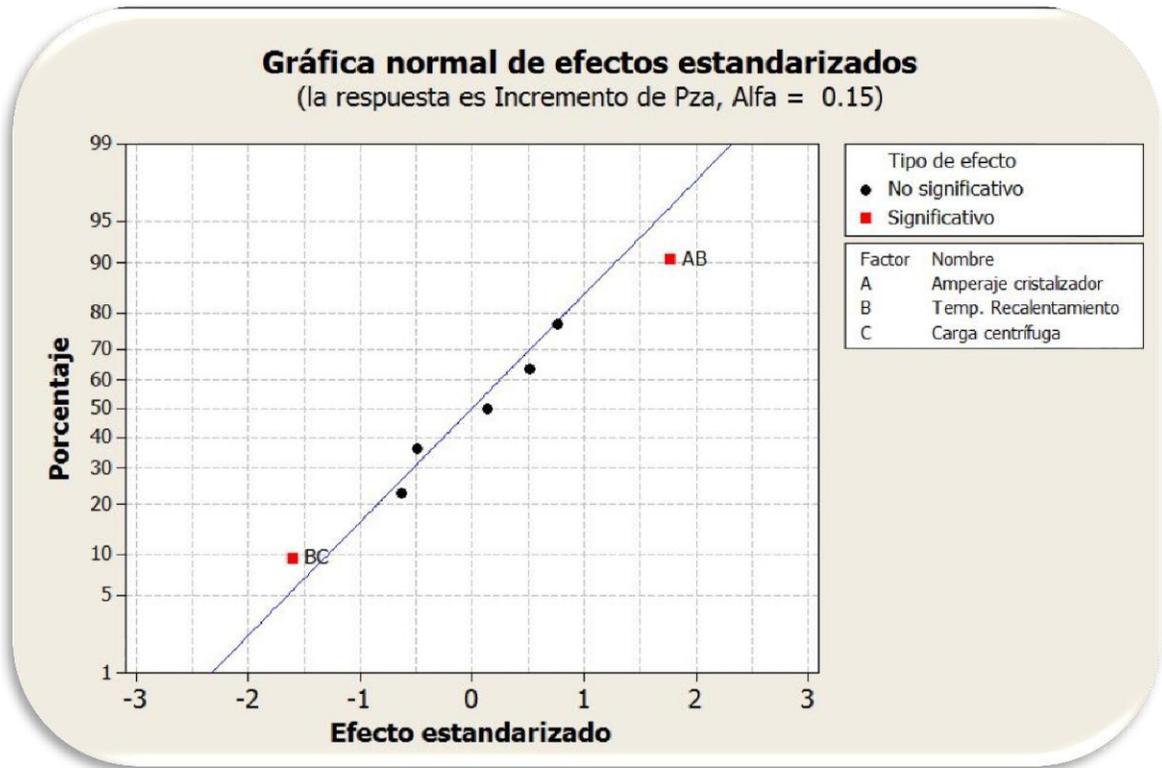
Quando se plantea un 95% de confianza ningún efecto resulta ser tan significativo, por tal razón se propone un  $\alpha=0.10$  en la Figura 7.11



**Figura 7.11:** Gráfica de efectos estandarizados para el incremento de pureza con  $\alpha=0.1$

Ahora se puede ver que al disminuir el nivel de confianza la interacción AB resulta ser significativa, esto ya se había visto en la Tabla 7.5 donde AB era la interacción más incidente seguido de BC y ABC

Para apreciar esto se disminuye un poco más el nivel de confianza hasta  $\alpha=0.15$  en la Figura 7.12



**Figura 7.12:** Gráfica de efectos estandarizados para el incremento de pureza con  $\alpha = 0.15$

Ahora la interacción BC es significativa, si se disminuye aún más el nivel de confianza irán siendo más significativos otros factores en interacciones. El nivel de confianza adecuado dependerá de cuanto error esté dispuesto a tomarse en el proceso.

### 7.3.6 ANOVA para el incremento de pureza

Con el ANOVA se determina cuales factores son estadísticamente significativos, se hará con un nivel de confianza de 95% ( $\alpha = 0.05$ , alfa es la probabilidad de cometer el error de rechazar los resultados siendo correctos).

**Tabla 7.7:** Valores de F para distintos niveles de confianza

Alfa	F
75	1.39
90	2.93
95	4.26

Fuente: Montgomery, 2004

El ANOVA se muestra en la Tabla 7.8

**Tabla 7.8:** ANOVA para el incremento de pureza con  $\alpha = 0.05$

Fuente de variación	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrado medio	F <sub>0</sub>	Valor P
A	0.90	1	0.90	0.26	No significativo
B	0.07	1	0.07	0.02	No significativo
C	1.98	1	1.98	0.58	No significativo
AB	10.60	1	10.60	3.12	No significativo
AC	0.83	1	0.83	0.24	No significativo
BC	8.72	1	8.72	2.57	No significativo
ABC	1.33	1	1.33	0.39	No significativo
Error	81.51	24	3.40		
Total	105.93	31			

Se aprecia que la suma de cuadrados del error es mayor que la de los factores e interacciones, esto significa que existe una fuente de variación no estudiada que se acumuló en el error.

Con un  $\alpha = 0.05$  ningún efecto es significativo, lo que confirma el análisis de las gráficas anteriores, así que al disminuir el nivel de confianza es de esperar que algunos factores se hagan más significativos.

La Tabla 7.9 muestra un ANOVA con  $\alpha=0.1$

**Tabla 7.9:** ANOVA para el incremento de pureza con  $\alpha=0.1$

Fuente de variación	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrado medio	F <sub>0</sub>	Valor P
A	0.90	1	0.90	0.26	No significativo
B	0.07	1	0.07	0.02	No significativo
C	1.98	1	1.98	0.58	No significativo
AB	10.60	1	10.60	3.12	Significativo
AC	0.83	1	0.83	0.24	No significativo
BC	8.72	1	8.72	2.57	No significativo
ABC	1.33	1	1.33	0.39	No significativo
Error	81.51	24	3.40		
Total	105.93	31			

Al disminuir el nivel de confianza el factor más significativo resulta ser AB, aunque con un error tan grande, es evidencia que existen otros factores no incluidos en este estudio que sean causantes de este error.

El hecho de que el error sea grande, y que posiblemente existan otros factores que deban estudiarse aparte de los estudiados aquí, no significa que los resultados obtenidos en este análisis no sean válidos.

En este estudio se observó que el factor más significativo es AB, lo que significa enfriar la masa (Amperaje de 9 A) y recalentarla respectivamente hasta 65°C, además es conveniente centrifugar a una carga baja siempre que los requerimientos de espacio en el cristizador lo permitan, esto es congruente con las experiencias obtenidas de los operarios de estos equipos.

## VIII. Conclusiones

Con base en las discusiones de los resultados obtenidos de las pruebas realizadas en el laboratorio a las mieles finales y muestras de Nutsch, se concluye que:

El modelo que mejor se adecúa a la situación de la empresa es el de Queensland Sugar Research Institute (QSRI), presentando una diferencia de tres puntos de pureza entre la real y la esperada.

La disminución del incremento de pureza de la miel final del área estudiada presenta incidencia significativa por las interacciones siguientes: la corriente eléctrica suministrada al motor del agitador en el cristalizador con la temperatura de recalentamiento de la masa y la temperatura de recalentamiento de la masa con la corriente eléctrica que controla la carga de masa en la centrífuga.

La disminución del incremento de pureza de la miel final del área estudiada se ve influenciada por los factores individuales y sus interacciones, de mayor a menor:

- ✓ La interacción de corriente suministrada al motor del agitador del cristalizador y temperatura de recalentamiento de la masa.
- ✓ La interacción suministrada al motor del cristalizador y la carga de la masa C a la centrífuga
- ✓ La carga de la masa C a la centrífuga
- ✓ La interacción de los tres factores
- ✓ La corriente suministrada al motor del cristalizador
- ✓ La interacción corriente suministrada al motor del cristalizador y la carga de la masa C a la centrífuga
- ✓ La temperatura de recalentamiento de la masa.

Se obtienen mejores resultados para minimizar el incremento de pureza, cuando el proceso se opera bajo las siguientes condiciones de operación:

Corriente eléctrica suministrada al motor del agitador en el cristalizador de 9 Amperios, Temperatura de recalentamiento de la masa a 60 °C, y una Carga de masa C a la centrífuga de equivalente a 100 Amperios.

Sin importar los niveles del amperaje del cristizador y la temperatura de recalentamiento, cuando se centrifuga a 100 Amperios de corriente eléctrica que controla la carga de masa en la centrífuga, el incremento de pureza se minimiza.

## IX. Recomendaciones

Con base en los resultados y encaminados a mejorar el proceso productivo del ingenio azucarero, se realizan las siguientes recomendaciones:

Centrifugar siempre que sea posible un ritmo bajo, con 100 A en las centrífugas.

No recalentar la masa más allá de 10 °C de lo que se enfrió en el cristalizador.

Si se prevé que será necesario desalojar la masa del cristalizador a un ritmo de 110 A de amperaje en las centrífugas, evitar enfriar la masa demasiado y manejar el cristalizador en 8.5 A para recalentar hasta 65 °C.

Siempre que sea posible garantizar las condiciones de operación:

Amperaje del cristalizador (A): 9

Temperatura de recalentamiento (°C)= 60

Carga de la centrífuga (A)= 100

Realizar una investigación posterior a este estudio en el que se incluyan factores no incluidos en este estudio, se sugiere incluir: lubricación de las mieles, factores humanos (operarios distintos), condiciones de la masa proveniente del tacho.

## X. Bibliografía

Arca, M. y Esparza, R., 2003. *Haciendo Azúcar: Cristalizadores y magma*. USA: Acra Corporation

Batule, E., 2001. *El control químico y de proceso en la industria azucarera*. Serie Azucarera 17

Chen, J. y Chou C., 2000. *Manual del azúcar de caña para fabricantes de azúcar de caña y químicos especializados*. Editorial McGraw Hill. México.

Clark, J. y García, F., 1986. *El Proceso de fabricación de azúcar crudo en los tachos*. Editorial Pueblo y Educación. Cuba.

Devore, Jay., 2005. *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias*. Sexta edición. Editorial Thomson Learning. México

Domínguez, F., 2003. *Agotamiento de mieles en la industria azucarera*. Matanzas, Cuba. Universidad de Matanzas. Facultad de Ingeniería Química-Mecánica. 34 p.

Fajardo, E y Sarmiento, S. 2007. *Evaluación de melaza de caña como sustrato para la producción de Saccharomyces cerevisiae*. Colombia. Pontificia Universidad Javeriana. Facultad de Ciencias Básicas. 120 p.

Gutiérrez, H y De la Vara, R., 2008. *Análisis y diseño de experimentos*. Segunda edición. Editorial McGraw-Hill. México.

Hernández, R. y Contrera, L., 2005. *Los Sistemas de masas cocidas y el agotamiento de las mieles en las condiciones actuales de materias primas*. Centro de Estudios Energéticos y procesos industriales. Cuba.

Hugot, E., 1986. *Handbook of Cane Sugar Engineering*. Third edition. Elsevier Science Publishers. Nueva Zelanda

Kuehl, R., 2001. *Diseño de experimentos: Principios estadístico para el diseño y análisis de investigaciones*. Segunda edición. Editorial Thomson Learning. México

Mechetti, M et al. 2011. *Propiedades reológicas de melados de caña de azúcar*. Universidad Nacional de Tucumán. Facultad de ciencias exactas. Argentina. 8 p.

Montgomery, D., 2004. *Diseño y análisis de experimentos*. Segunda edición. Editorial Limusa. México

Polanco, L., 2009. *Assessment of Target Purity Difference for a Louisiana Sugar Mill*. Thesis of Master of Science in Chemical Engineering. Louisiana, USA. Louisiana State University, Engineering College. 115 p.

Rein, P., 2007. *Cane Sugar Engineering*. Alemania

Vega-Baudrit, J et al. 2007. *Uso alternativo de la melaza de la caña de azúcar residual para la síntesis de espumas rígidas de poliuretano (ERP) de uso industrial*. Revista Redalyc. Volumen 22. Número 2. México. 8 p.

## Sitios Web Consultados

Domínguez, F., 2004. *Caracterización Industrial del Proceso de cristalización por enfriamiento*. [En línea]. Universidad de Matanzas. Cuba.

<<http://monografias.umcc.cu/monos/2004/QuiMec/um04QM04.pdf>>.

[Consultado: 10 de marzo 2012]

Domínguez, F., 2003. *Agotamiento de mieles en la industria azucarera*. [En línea]. Universidad de Matanzas. Cuba.

<<http://www.bibliociencias.cu/gsdll/collect/libros/index/assoc/HASH5a93.dir/doc.pdf>>. [Consultado: 10 de Marzo 2012]

Fajardo, E. y Sarmiento, S; 2007. *Evaluación de melaza de caña como sustrato para la producción de Saccharomyces cerevisiae*. [En línea]. Pontificia Universidad Javeriana. Colombia.

<<http://www.javeriana.edu.co/biblos/tesis/ciencias/tesis26.pdf>>.

[Consultado: 14 de Noviembre 2012]

Hernández, R. y Contrera L., 2005. *Los Sistemas de masas cocidas y el agotamiento de las mieles en las condiciones actuales de materias primas*. [En línea]. Centro de Estudios Energéticos y procesos industriales. Cuba.

<<http://biblioteca.idict.villaclara.cu/UserFiles/File/ciencia/179-05-01-04.pdf>>.

[Consultado: 20 de febrero 2012]

Polanco, L., 2009. *Assessment of Target Purity Difference for a Louisiana Sugar Mill*. [En línea]. Louisiana State University. USA.

<[http://etd.lsu.edu/docs/available/etd-07022009-](http://etd.lsu.edu/docs/available/etd-07022009-143617/unrestricted/assessment-of-target-purity-difference-for-a-louisiana-sugar-mill.pdf)

[143617/unrestricted/assessment-of-target-purity-difference-for-a-louisiana-sugar-mill.pdf](http://etd.lsu.edu/docs/available/etd-07022009-143617/unrestricted/assessment-of-target-purity-difference-for-a-louisiana-sugar-mill.pdf)>. [Consultado: 27 de febrero 2012]

Vega-Baudrit, J et al. 2007. *Uso alternativo de la melaza de la caña de azúcar residual para la síntesis de espuma rígidas de poliuretano (ERP) de uso industrial*. [En línea]. Revista Redalyc. México.

<<http://redalyc.uaemex.mx/src/inicio/ArtPdfRed.jsp?iCve=48222207>>.

[Consultado: 14 de Noviembre 2012]

Mechetti, M et al. 2011. *Propiedades reológicas de melados de caña de azúcar*. [En línea]. Argentina.

<<http://www.herrera.unt.edu.ar/revistacet/ultimonro/nro33/pdf/n33inv02.pdf>>.

[Consultado: 14 de Noviembre 2012]

## XI. NOMENCLATURA

A, B, C	Factores de estudio: amperaje del cristizador, temperatura de recalentamiento de la masa y carga de la centrífuga respectivamente. También representan los productos azucarados del sistema de masas cocidas, la primera, segunda y tercera masa respectivamente; así como sus mieles y magmas respectivos.
A	Amperes, unidad de medida de la intensidad eléctrica
C	Cenizas
AB	Interacción entre el amperaje del cristizador y la temperatura de recalentamiento
AC	Interacción entre el amperaje del cristizador y la carga de las centrífugas
AR	Azúcares reductores
BC	Interacción entre la temperatura de recalentamiento de la masa y la carga de las centrífugas
CS	Coefficiente de saturación
E	índice de agotabilidad
Ec	Ecuación
F	Coefficiente de la prueba de Fischer
g	Gramo, unidad de medida de la masa
h	Hora
Log	Logaritmo
MCA	Masa cocida A
MCB	Masa cocida B
MCC	Masa cocida C
MF	Miel final
mL	Mililitro, unidad de medida del volumen
MS	Medium square, cuadrados medios del análisis de varianza

n	Número de réplicas
NA/A	No agua / agua
Pol	Unidad de medida de la cantidad de sacarosa en un material, expresado como porcentaje
PPM	Partes por millón
PSI	Pounds square inches, unidad de medida de la presión
Pza	Pureza
Q	Pureza real de las mieles
Q <sub>L</sub>	Menor pureza obtenible
SS	Sobresaturación
	Suma de cuadrados, en el diseño de experimentos
Sat	Saturación
t	Temperatura

### **Letras griegas**

$\alpha$	error estadístico del Tipo I (error de rechazar la muestra cuando es correcta).
----------	---

### **Otros símbolos**

%	Porcentaje
°C	Grados Celsius, unidad de medida de la temperatura
+	Valor alto de un factor
-	Valor bajo de un factor
>	Mayor

## XII. GLOSARIO

**Cachaza:** Es la torta que se forma en los filtros rotatorios en la estación de tratamiento de jugo, esta torta de filtro o cachaza se usa como fertilizante de los campos, las pérdidas de sacarosa en esta torta se contabilizan mediante la Pol en cachaza.

**Bagazo:** Es el subproducto de la molienda o difusión de la caña. Este subproducto se usa como combustible para las calderas u otros usos.

**°Brix:** Porcentaje en peso de los sólidos en una solución pura de sacarosa. Usualmente determinados por refractometría en el laboratorio.

**Centrífugas:** Consiste en un tambor perforado o canasta que gira sujeta a un eje, la canasta gira dentro de la caja que recoge las mieles expelidas por la fuerza centrífuga, en estos equipos se separan las mieles del azúcar correspondiente.

**ICUMSA:** United States National Committee, son métodos estándares de análisis de laboratorio.

**Imbibición:** Es la acción de agregar agua a los molinos para incrementar la extracción de sacarosa, al agua añadida se le llama agua de imbibición, usualmente a una temperatura de 60°C. Esta puede ser imbibición simple, Imbibición compuesta, compuesta múltiple según el arreglo de donde se agregue agua.

**ISSCT:** International Society of Sugar cane Technologist (Sociedad internacional de tecnólogos de caña de azúcar de Queensland, Australia)

**Magma:** Es uno de los productos de la separación de la centrifugación, estas separan la masa en mieles y magmas, en el magma está idealmente todo el contenido de cristales de la masa.

**Masa cocida:** Es la mezcla de magma (azúcar) y mieles (licor madre), esta masa se coce en los tachos hasta alcanzar la cristalización. En un sistema de tres masas cocidas se les denomina masa A o de primera, masa B o de segunda y masa C o de tercera.

**Melaza:** Mejor conocida como miel final, es la miel que se separa de las centrífugas de tercera, esta miel final no retorna al proceso y se vende como alimento de ganado o como materia prima de las destilerías de alcohol.

**Nutsch:** Son pruebas de laboratorio realizadas a la miel contenida en la masa en la entrada y salida del cristizador, para separar la miel de la masa se usa un filtro a presión.

**Pol:** Es el valor obtenido por polarización directa o sencilla del peso normal de una solución en un sacarímetro. La ISSCT define la sacarosa como: “El compuesto químico llamado así, también llamado sucrosa o azúcar de caña”. Sacarosa y Pol son dos términos diferentes.

**Pureza:** Básicamente la pureza de un producto azucarero es el azúcar de caña presente en términos de porcentaje de la materia sólida. Puesto que el azúcar puede expresarse como Pol o Sacarosa y los sólidos como °Brix, sólidos por refractometría o sólidos por secado, la pureza se puede expresar en varias formas.

Pureza Verdadera

$$p = \frac{\text{sacarosa}}{\text{sustancia seca}}$$

Pureza por gravedad

$$p = \frac{\text{sacarosa}}{\text{Brix}}$$

Pureza aparente

$$p = \frac{\text{pol}}{\text{Brix}}$$

**Tachos:** Recipientes cilíndricos donde se cocen la meladura, magmas y mieles hasta llegar al punto donde aparecen los cristales de sacarosa, estos tachos operan al vacío para disminuir la temperatura de ebullición del agua y evitar la caramelización de la sacarosa.

**Templa:** Es cada una de las cargas que realiza un tacho, estos trabajan en lotes; cuando se cargan, cocen la masa y luego descargan se dice que se ha hecho una templa.

**Zafra:** Es la temporada en que se realiza la recuperación de azúcar en la fábrica, en Nicaragua este periodo se extiende desde noviembre hasta mayo.

# Anexo A

## Métodos de Análisis

### **A.1 Determinación de Purezas de magmas, mieles y jugos**

1. Pesar la miel a usar para análisis (al menos 20 g).
2. Pesar una cantidad de agua igual a la del inciso 1.
3. Homogenizar el agua con la miel, con ayuda de un agitador eléctrico.
4. Pesar 26 g de la mezcla del inciso 3 (lo que sobre no botarlo, se usará para leer °Brix).
5. Aforar con agua destilada en un balón de 200 mL.
6. Llevar a un beaker y agregar 30g de agente clarificante (octapol).
7. Homogenizar con ayuda de agitador.
8. Filtrar
9. Leer °Brix en un refractómetro con la mezcla que sobró en el inciso 4, mientras se filtra la solución.
10. Del filtrado del inciso 8 medir 50 mL en un balón
11. Agregar 5 mL de ácido acético al 10% y mezclar completamente.
12. Leer Pol en un Autopol 880, Automatic Saccharimeter.
13. El valor de °Brix del inciso 9 multiplicarlo por 2 y usar este valor para el cálculo de pureza y el valor de Pol del inciso 11 multiplicarlo por 4,4 para usar este valor.
14. Calcular Pza ( $Pza = Pol / °Brix * 100$ )

### **A.2 Determinación de Pureza de Nutsch**

1. Pesar la muestra de Nutsch (al menos 20 g).
2. Pesar una cantidad de agua caliente igual a la del inciso 1.
3. Homogenizar el agua con el Nutsch.
4. Cuando esté totalmente homogéneo pesar 26 g de la mezcla, no botar el excedente porque se usará para medir °Brix.
5. Aforar con agua destilada en un balón de 200 mL.
6. Llevar a un beaker y agregar 30g de clarificante (octapol).
7. Homogenizar.
8. Filtrar.
9. Mientras se filtra la solución tomar el excedente que quedó del inciso 4 y medir °Brix en un refractómetro.
10. Medir 50mL del filtrado en un balón y agregar 5mL de ácido acético.
11. Leer Pol en el polarímetro
12. El valor de °Brix del inciso 9 multiplicarlo por 2 y usar este valor para el cálculo de pureza y el valor de Pol del inciso 11 multiplicarlo por 4,4 para usar este valor.
13. Calcular Pza ( $Pza = Pol / °Brix * 100$ )

# Anexo B

# Cálculos

## B.1 Balance general de materiales

Datos Conocidos a partir de la teoría o laboratorio:

Base de cálculo: 1000 kg / h (1TM)

% Agua de imbibición: 26

Bagazo % caña = 26.45 %

Cachaza % caña = 4.43 %

Miel final (kg/ TM caña) = 37.1

°Brix Jugo claro= 13.92

°Brix meladura evaporada = 69.08

### Molinos

Caña + agua imbibición = bagazo+ jugo mezclado

$(1\ 000\ \text{kg/h}) + (0.26 \cdot 1\ 000\ \text{kg/h}) = (0.2645 \cdot 1\ 000\ \text{kg/h}) + \text{jugo mezclado}$

Jugo mezclado= 995.5 kg/h

Para determinar el peso correcto del jugo mezclado se usan básculas, así como para el bagazo o simplemente se determina por diferencia.

### Clarificación

Jugo mezclado = jugo claro + cachaza

Jugo claro=  $(995.5\ \text{kg/h}) - (0.0043 \cdot 1\ 000\ \text{kg/h})$

Jugo claro = 991.2 kg/h

Cachaza= 4.3 kg/h

La cachaza también se pesa para conocer su peso, se le realizan análisis de pureza para conocer la cantidad de sacarosa perdida.

### Evaporación

Jugo claro = agua evaporada + meladura evaporada

Agua evaporada = jugo claro \*  $(1 - \text{°Brix Jugo claro} / \text{°Brix meladura evaporada})$

Agua evaporada=  $991.2\ \text{kg/h} \cdot (1 - 13.92/69.08)$

$$\text{Agua evaporada} = 991.2 \text{ kg/h} \cdot 0.7984$$

$$\text{Agua evaporada} = 791.46 \text{ kg/h}$$

$$\text{Meladura evaporada} = 991.2 \text{ kg/h} - 791.46 \text{ kg/h}$$

$$\text{Meladura evaporada} = 199.73 \text{ kg/h}$$

El agua evaporada es usada como vapor para los tachos, esta meladura evaporada se clarifica antes de enviarla a la estación de tachos.

Con un tiempo de residencia aproximado de 4h, se requiere calcular la cantidad de energía para evaporar el agua.

### **Tachos y centrífugas**

$$\text{Meladura evaporada} = \text{Azúcar comercial} + \text{miel final}$$

$$\text{Azúcar comercial} = (199.73 \text{ kg/h}) - (37.1 \text{ kg/h})$$

$$\text{Azúcar comercial} = 162.63 \text{ kg/h}$$

$$\text{Miel final} = 37.1 \text{ kg/h}$$

El azúcar comercial tiene una pureza de 99.5 % aproximadamente; la miel final, cerca de 32 %