



Reporte Final de Estadía

Jessica Montserrat González Solís

**Optimización de Cristalizado en Elaboración
de Azúcar Refinada**



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DEL CENTRO DE VERACRUZ

Programa Educativo en Ingeniería en Procesos Bioalimentarios

Proyecto de estadía realizado en la empresa Central el Potrero S.A. de C.V.

Nombre del Proyecto:

Optimización de Cristalizado en Elaboración de Azúcar Refinada

Nombre del asesor industrial:

Ing. Carlos Jesús Vidal Flores

Nombre del asesor académico:

M.C. en Alim. Gregorio Zárate Castillo

Presenta:

Jessica Montserrat González Solís

Índice

Agradecimientos.....	1
1. INTRODUCCIÓN.....	4
1.1 Glosario	5
1.2 Antecedentes	7
1.2.1 Misión	8
1.2.2 Visión.....	8
1.3 Antecedentes del área.....	9
1.4 Planteamiento del problema.....	10
1.5 Objetivo General	10
1.5.1 Objetivos Específicos.....	10
2. MARCO TEÓRICO	11
2.1 Diagrama de Proceso de Elaboración del Azúcar Refinada.....	12
2.2 Descripción del proceso de Cristalización.....	15
2.2.1 Puntos críticos en la etapa de cristalización.....	16
2.2 Descripción de los Cristalizadores	23
3. METODOLOGÍA	25
3.2 Análisis de condiciones para la cristalización	28
3.2.1 Cantidad de molienda de caña	29
3.2.2 Flujos de Vapor	29
3.2.3 Condiciones energéticas en los cristalizadores.....	29
3.2.4 Núcleos cristalinos	30
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	34
4.1 Determinación de los factores del proceso de cristalización.....	35
4.2 Análisis estadístico de las variables de estudio.	39
5. CONCLUSIONES.....	41
6. BIBLIOGRAFÍA.....	42
7. RECOMENDACIONES.....	¡Error! Marcador no definido.
8. ANEXOS	¡Error! Marcador no definido.

Índice de Figuras

Figura 1.	Central El Potrero S.A. de C.V.	9
Figura 2.	Diagrama de proceso de azúcar	12
Figura 3.	Zonas de concentración en la etapa de cristalización	17
Figura 4.	Combinación de la nucleación	22
Figura 5.	Tacho cristizador	24
Figura 6.	Proceso de cristalización área de crudo	25
Figura 7.	Sistema de templas área crudo	26
Figura 8.	Diagrama de cristalización refino	27
Figura 9.	Cristalizador industrial de sacarosa	30

Índice de Tablas

Tabla 1.	Descripción de medidas tachos de refino	23
Tabla 2.	Descripción de medidas tachos de crudo	23
Tabla 3.	Ficha técnica núcleos cristalinos	28
Tabla 4.	Pureza de mieles y azúcares crudos	31
Tabla 5.	Valores promedio de licores	32
Tabla 6.	Sistemas medidos en la etapa de cristalización	32
Tabla 7.	Valores promedio de siropes	32
Tabla 8.	Factores de estudio	32
Tabla 9.	Combinación de tratamientos	33
Tabla 10.	Determinación de temperatura, pureza y brix de masa cocida mes Enero	34
Tabla 11.	Determinación de temperatura, pureza y brix de masa cocida mes Febrero	34
Tabla 12.	Determinación de temperatura, pureza y brix de masa cocida mes Marzo	34
Tabla 13.	Resultados del monitoreo de cristalización mes Enero	35
Tabla 14.	Resultados del monitoreo de cristalización mes Febrero	36
Tabla 15.	Resultados del monitoreo de cristalización mes Marzo	37
Tabla 16.	Análisis de varianza para la concentración (°Bx)	39
Tabla 17.	Análisis de varianza para la pureza	39

Índice de Gráficas

Gráfica 1.	Comportamiento brix mes Enero – Marzo	38
Gráfica 2.	Comportamiento pureza mes Enero – Marzo	38
Gráfica 3.	Comportamiento temperatura mes Enero – Marzo	38
Gráfica 4.	Efectos estandarizados de las variables.	40

Agradecimientos.

En primer lugar, quiero agradecer a Dios por permitirme tener la oportunidad de superarme profesionalmente, por haberme dado la familia que me dio, en especial mi mamá Josefina Solís Cervantes, mami quiero agradecerte porque me apoyas en cada decisión que he tomado buena o mala siempre has estado ahí conmigo, mi hermano, tías, primos, abuelos, y aunque ya no estás aquí papa Leonardo quiero agradecer todo lo que hiciste por mí y mi hermano.

A mi asesor Gregorio por soportarme en los cuatrimestres que nos dio clase y a su hoy esposa Xóchitl y Nayeli por tener las puertas abiertas del laboratorio para nosotros sin previo aviso, a mis demás maestros me quedo con un cariño especial para todos Olivia, Félix, Ismael, Licet, Uganda y Esther.

Al Ing. Vidal por apoyarme en esta esta y brindarme la oportunidad de formar parte de su equipo de trabajo durante mi estadía, al Ing. Barragán por la paciencia que tuvo para enseñarme detalle a detalle los procedimientos, es usted una gran persona y un gran amigo para conmigo, al Ing. Platón por lo que me enseñó y ayudo con las dudas que tuve, y gracias por la confianza que me hizo sentir, al Ing. Maldonado porque con sus preguntas, hizo que me aplicara más para la siguiente ronda, y a los demás Ingenieros Eder, Navarro, Maciel y Brito por hacerme sentir parte del equipo de Elaboración.

A mis niñas, mis amigas Abigail, Luz María, Itzel las quiero mucho, y me da gusto que en algún momento hayamos tenido nuestras diferencias porque eso demostró que nuestra amistad es más grande que cualquier diferencia, gracias por estar conmigo en las buenas y en las malas me las llevo en el corazón y para toda la vida.

Resumen

En el presente trabajo se aborda el análisis de la etapa de cristalización, las etapas que la conforman y que son de gran importancia, se estudia la situación actual y perspectivas de solución que permitan, de forma económica y eficiente analizar las variables que pueden afectar de manera significativa el desarrollo de esta etapa y buscar el mejoramiento en la cristalización de azúcar en Central El Potrero S.A. de C.V.

La cristalización es un proceso de purificación y separación de un soluto a partir de una solución sobresaturada, mediante la formación de cristales en el seno de la solución, logrando purezas superiores al 99%., esta es una parte fundamental que implica diferentes operaciones unitarias que intervienen en el proceso azucarero y se convierte a su vez, en puntos críticos importantes los cuales son variables difíciles de controlar otra variable importante a controlar es la sobre saturación de la miel que se cristalizara en los equipos esto con el fin de tener una Distribución de Tamaño del Cristal adecuada.

Se aplicó un análisis estadístico, para comparar tres variables de importancia como lo son la temperatura, los grados brix y la pureza de la masa cocida, los factores que se presentan fueron monitoreados por tres meses sacando un promedio diario, el monitoreo se realizó en la terminación de cada templa elaborada en el primer turno, esto se hizo solo en templas de “A”.

Se observó en las gráficas y en los análisis estadísticos, que la pureza, es el factor que causa mayor afectación a una buena o mala cristalización, la temperatura, al permanecer casi constante no causa variación, y los grados brix quedando en segundo término, sabiendo que si la concentración no es la idónea, se obtendrá azúcar de menor calidad.

Abstract

In the present work the analysis of the crystallization stage is analyzed, the stages that make up and that are of great importance, it is studied the current situation and perspectives of solution that allow, economically and efficiently to analyze the variables that can affect in a way Significant development of this stage and seek the improvement in sugar crystallization in Central El Potrero SA of C.V.

Crystallization is a process of purification and separation of a solute from a supersaturated solution, through the formation of crystals within the solution, achieving purities higher than 99%. This is a fundamental part that involves different unitary operations that Intervene in the sugar process and becomes, in turn, important critical points which are variables difficult to control another important variable to control is the over saturation of the honey that will crystallize in the teams this in order to have a Distribution of Adequate Crystal Size.

A statistical analysis was applied to compare three important variables such as temperature, brix degrees and purity of the cooked mass, the factors that were presented were monitored for 3 months taking a daily average, the monitoring was performed in the Completion of each templa elaborated in the first turn, this was done only in temples of "A".

It was observed in the graphs and in the statistical analyzes, that purity is the factor that causes greater affectation to a good or bad crystallization, the temperature, being almost constant does not cause variation, and the brix degrees being in second term, knowing That if the concentration is not the ideal, you will get lower quality sugar.

1. INTRODUCCIÓN

La elaboración del azúcar es uno de los procesos más extensos y complicados en la industria, debido a la diversidad de operaciones unitarias existentes en el proceso. Por lo tanto, interviene gran variedad de factores: humanos, operacionales, mecánicos, económicos, políticos, etc.

En el presente trabajo se aborda el análisis de la situación actual y perspectivas de solución que permitan, de forma económica y eficiente el mejoramiento en la cristalización de azúcar refinada en Central El Potrero S.A. de C.V.

La cristalización es una operación de transferencia de materia en la que se produce la formación de un sólido (cristal o precipitado) a partir de una fase homogénea (solute en disolución o en un fundido).

Los objetivos principales del proceso de cristalización son:

- Obtención de producto de alta calidad.
- Obtención de excelente recuperación del producto.

Los factores que afectan la calidad del producto y la recuperación son:

- Calidad de la meladura que alimenta el tacho.
- Grado de control del proceso de cristalización.
- Efectividad de la etapa de cocimiento de la templa.
- Nivel de calidad de las etapas de centrifugación y secado.
- Grado de control sobre el proceso de cristalización, por la importancia que representa en la eficiencia en fabrica y calidad del producto.

Para lograr la cristalización de soluciones líquidas, se deben sobresaturar, esto se logra mediante equipos llamados cristalizadores, en los cuales se enfrían las soluciones saturadas, a veces para favorecer la cristalización se agregan cristales pequeños de la misma sustancia que se desea cristalizar, esta siembra fomenta la cristalización al servir de núcleos en los que principia la formación de cristales.

1.1 Glosario

Azúcar: Cristales de sacarosa, removidos de una masa cocida.

Caña: Gramínea tropical que pertenece a la misma tribu (Andropogoneae) que la del sorgo, el pasto Johnson y el maíz. La caña como se recibe en la fábrica es “Caña en Bruto” al sustraer la basura del campo se obtiene la “Caña Neta”

C.I.: Color INCUMSA, es la determinación de color por absorbancia en azúcares blancos. En azúcar refinada es máximo permitido es 45 INCUMSA.

Cristalización: Es un proceso de separación sólido – líquido en el que la masa es transferida de un soluto disuelto en una fase líquida a una fase sólida (cristal); en estos casos, la solución debe ser sobresaturada y los cristales que se desean obtener deben contener elevada pureza.

Grados Brix: Es el porcentaje en peso de los sólidos en una solución pura de sacarosa, representa los sólidos aparentes en una solución azucarada libre de impurezas insolubles. El método de la determinación de los grados brix representa el porcentaje en masa de la sacarosa presente en una muestra.

Impureza: Todas las sustancias diferentes a la sacarosa presentes como sólidos solubles e insolubles dentro de un material determinado.

Masa cocida: Se llama así al jarabe o mieles concentradas en las que el azúcar ha cristalizado o el material que se ha concentrado hasta un punto en el cual cristalizara.

Melaza o miles: Se conocen con este nombre a las aguas madre separadas de los cristales cuando la masa cocida pasa por una centrífuga, a estas mieles se les denominan con letras o números que corresponden a los de las masas cocidas.

Núcleos cristalinos: Agente químico que se usa como semilla para la formación de los cristales en los tachos de refino.

Pol: Término abreviado de la polarización. Es utilizado en los ingenios para establecer el porcentaje aparente de sacarosa de una muestra mediante la determinación de su polarización directa en un polarímetro (sacarímetro). El método se basa en la medición del cambio de la rotación óptica que depende principalmente, del contenido de sacarosa en una muestra azucarada.

Pureza: Es la cantidad de sacarosa contenida en 100 partes de sólidos totales, expresada en por ciento. En la práctica, la pureza aparente se calcula con los valores de Pol y de Brix, mediante la siguiente expresión.

$$\text{Pureza} = (\text{Pol} / \text{Brix}) * 100$$

Ec. 1 Porcentaje de pureza

Rendimiento: Total de producción en crudo y refino, es decir el total de cristales obtenidos sin tomar en cuenta su composición.

Sacarosa: Carbohidrato de fórmula general $C_{12}H_{22}O_{11}$ y comercialmente se le conoce como azúcar y es obtenida a partir de la caña de azúcar o remolacha.

Semilla: En la industria azucarera se denomina semilla a aquellos polvos de cristal de sacarosa, de un tamaño promedio de 10 μm .

Tacho: Es la nomenclatura que se les asigna comúnmente a los cristalizadores en la industria azucarera, son recipientes al vacío y dependiendo de la etapa de cristalización se les denomina tachos de crudo o tachos de refino.

Templa: El jarabe y las mieles en determinadas proporciones, desarrollan cristales de azúcar, este proceso se inicia cuando la especie calefactora se cubre solo lo suficiente para obtener circulación y termina con una carga completa.

Zafra: Nombre que se le da al periodo en el cual se produce azúcar de caña en los ingenios azucareros, consta de la cosecha de la caña, producción de las mieles del jugo de la caña y obtención del azúcar final.

1.2 Antecedentes

Beta San Miguel (BSM) es el primer productor de azúcar de caña del país con una producción en la Zafra 2014/2015 de 782,788 toneladas de azúcar de caña, representando el 13.08% de la producción de México.

El estado de Veracruz es uno de los mayores productores de Caña de Azúcar a nivel nacional, cuenta con 22 ingenios, de los cuales destaca Central El Potrero S.A. de C.V. La industria azucarera en México se remonta a la época de la colonia, el primer ingenio en México fue "El Potrero" La construcción del ingenio fue iniciada en 1905 y terminada en 1908 por la compañía nacional mexicana refinadora de azúcar.

A partir de entonces ha sido operado bajo las razones siguientes:

- Cía. Nacional Refinadora de azúcar hasta 1909
- Unidad Industrial Hacienda "El Potrero" hasta 1925
- Cía. Manufacturera "El Potrero", S. A. Hasta 1944
- Ingenio "El Potrero", S. A. Hasta 1975

En el periodo comprendido de 1944 a 1975, fue dirigido por su propietario el Sr. Don Erich Koenig, visionario industrial creador de las actuales instalaciones fabriles, quien en el año de 1963 realizó la ampliación a dos tándems de molienda y la remodelación total de la factoría en un lapso de tiempo récord, y además llevó esta empresa al primer plano en la industria azucarera nacional, y la dio a conocer en el ámbito internacional.

Desde 1975 hasta noviembre de 1988, fue una empresa paraestatal presidida por el Director General de Azúcar, S.A. A partir del 28 de noviembre de 1988 la empresa Xafra, S.A. de C.V. adquirió "El Potrero". De 1993 a Septiembre de 2001 fue administrado por el Consorcio Azucarero CAZE, S.A. de C.V., a partir de la Expropiación del 3 de Septiembre de 2001 hasta el 26 de Agosto de 2016 fue administrado por el Gobierno a través de la SAGARPA. Actualmente lleva el nombre de **CENTRAL EL POTRERO S.A. de C.V.**, cuyo propietario es la empresa azucarera **Beta San Miguel**.

La unidad industrial se localiza en los 18°53'05" la Latitud Norte y 96°47'15' de Longitud Oeste del Meridiano de Greenwich, más o menos de la parte central del territorio del Estado de Veracruz, a 20Km. de la Ciudad de Córdoba, con una elevación de 503.00 m. sobre el nivel del mar, ubicada en la Villa Gral. Miguel Alemán, Municipio de Atoyac, Ver.

1.2.1 Misión

Ofrecer al mercado productos y servicios que superen las expectativas de nuestros clientes, anticipándonos a sus necesidades en cuanto a: costo, calidad, oportunidad e innovación. Esto lo lograremos a través de:

Alcanzar estándares de clase mundial que impliquen mejoras en: productividad, costos, sistemas, tecnología y servicio.

Generar los recursos económicos suficientes que nos permitan crecimiento, inversión, estabilidad y utilidades que cubran las expectativas de nuestros trabajadores y accionistas.

Promover un ambiente de comunicación y apertura orientado a la estructura organizacional, accionaria, tecnológica y de mercado.

Capacitar en lo técnico, administrativo y humano a nuestro personal elevando su nivel profesional y cultural.

Conservar el interés por mantenernos actualizados sobre los avances tecnológicos mundiales en todas las áreas para su oportuna implantación.

Resolver aspectos potenciales de daños a la ecología, actuando sobre las causas, mediante sistemas de trabajo e inversiones que mejoren el medio ambiente de nuestras fábricas y de sus áreas de influencia.

1.2.2 Visión

Vemos a BETA SAN MIGUEL como el mejor grupo azucarero del país dentro del marco de globalización, siendo competitivo con estándares de clase mundial en tecnología, calidad y costo, para mayor satisfacción de nuestros clientes.

1.3 Antecedentes del área

El azúcar refinado por su composición de 99.90% de sacarosa es un producto químicamente puro y que ninguno otro se puede obtener en producciones tan elevadas como el azúcar. El proceso de elaboración del azúcar refinado se divide en dos subprocesos o áreas fundamentales: área de crudo y área de refino, de los cuales cada uno tiene sus etapas principales.

La etapa en la cual se enfoca el proyecto a seguir es el área de crudo, la cual es la etapa previa a que el material pase a la etapa de refino esta es la última etapa de proceso de elaboración, la masa cocida pasa a las centrifugas para la extracción del sirope (humedad) para posteriormente pasar a pre-secadoras, secadoras y finalmente el envase.

En esta fase se encuentra la cristalización en los llamados TACHOS, en esta área se enfocará el estudio a realizar para la mejora y optimización de esta área.

En el trabajo de cristalización es conveniente para que los cristales se formen en el licor, y que exista una sobresaturación considerable. La sobresaturación del licor disminuye en la proporción en que los cristales se formen y crecen, para conservar la sobresaturación, es necesario entonces mantener la evaporación del agua y el suministro de material azucarado.



Fig. 1 Central Potrero S.A. de C.V.

1.4 Planteamiento del problema

El presente trabajo pretende desarrollar un estudio en el proceso de azúcar, aplicado en la etapa de cristalización, en Central El Potrero se cuentan con 15 tachos de los cuales 10 pertenecen al área de crudo y 5 al área de refino.

En el área de crudo se elaboran templas de A, B y C según corresponda su alimentación, en el área de refino se elaboran templas de 1ra, 2da, 3ra y 4ta, estas según el tipo de miel con que se alimente.

Los tiempos de cocción de cada templa varían de acuerdo a la alimentación, temperatura, vacío y presión de vapor que tengan los tachos en el momento de elaboración de las templas. Este trabajo está enfocado en el estudio de las variables para la optimización de la cristalización en el área de refino, proceso en el cual se lleva a cabo el azúcar refinado.

Cada templa, de acuerdo con la pureza de la miel, necesita de cierto tiempo para su elaboración. A más bajas purezas en masas cocidas las templas demoran más. La operación de los tachos también está afectada por la circulación, temperatura y vacío. El tiempo de operación puede variar por las condiciones e instalaciones locales. El tiempo para completar una templa es lo que determina la capacidad operacional de los tachos y por eso este tiempo, debe ser el mínimo posible.

1.5 Objetivo General

Determinar las condiciones ideales mediante un análisis estadístico de las variables que optimicen la etapa de Cristalización, para mejorar el proceso.

1.5.1 Objetivos Específicos

- Determinar las variables que intervienen en el proceso de cristalización.
- Realizar un análisis experimental para conocer la variable de mayor afectación.
- Comparar los resultados obtenidos, con el fin de mejorar el proceso.

2. MARCO TEÓRICO

La caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L), es una gramínea tropical, un pasto gigante emparentado con el sorgo y el maíz en cuyo tallo se forma y se acumula el jugo rico en sacarosa, sintetizada gracias a la energía tomada del sol durante la fotosíntesis.

- Tallo: Macizo, cilíndrico (5 – 6 cm de diámetro), alargado (altura de 2 – 5 m) y sin ramificaciones. La caña tiene una riqueza en sacarosa del 14% aprox.
- Raíz: El sistema radicular lo compone un robusto rizoma subterráneo.
- Hoja: Larga, delgada y plana. Recubiertas por pequeñas vellosidades con numerosas aperturas estomáticas.
- Inflorescencia: Para que aparezca la inflorescencia es necesario que se den una serie de condiciones de edad, fertilización, fotoperiodo, temperatura y humedad adecuadas.

El producto estrella de esta especie es el azúcar que se obtiene tras la extracción del jugo de los tallos. Este jugo grisáceo, verdoso y con un toque amargo, se trata con productos químicos para reducirlo a un jarabe y después se hierva hasta que se cristaliza. El azúcar de la caña es un hidrato de carbono que provee energía al cuerpo.

Gracias a sus propiedades antisépticas, diuréticas, laxantes y cardiotónicas, también tiene algunos usos medicinales.

2.1 Diagrama de Proceso de Elaboración del Azúcar Refinada

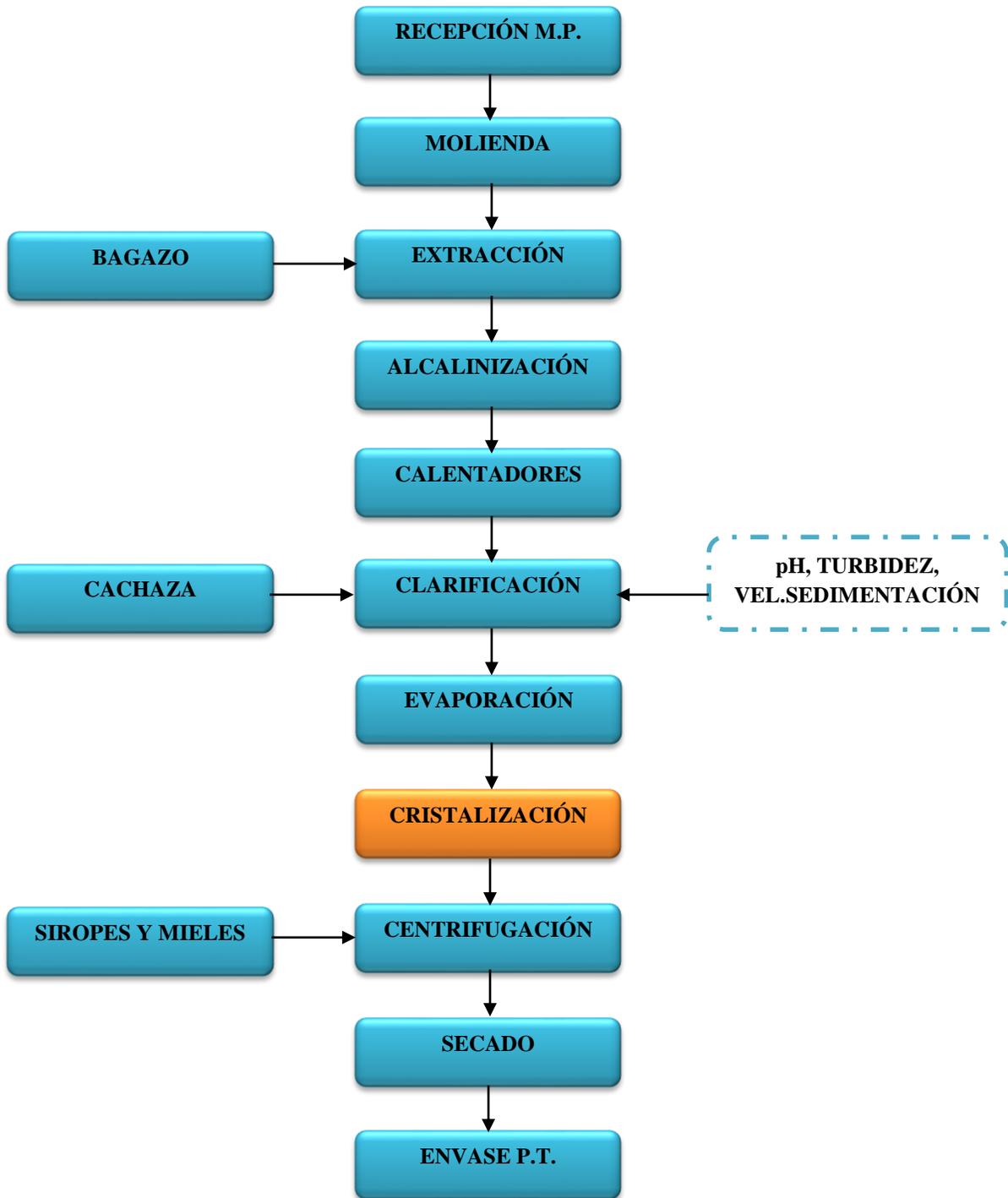


Fig. 2 Diagrama de Proceso de Azúcar.

Recepción de la materia prima. En seguida la caña se descarga en las mesas transportadoras para pasar a las desfibradoras, que la convierten en pequeños trozos facilitando la extracción del jugo en los molinos. Es aquí cuando comienza la fase de molienda, a través de un tándem de molinos que extraen el jugo de caña.

Molienda. La caña es picada en máquinas especialmente diseñadas para obtener pequeños trozos de caña.

Extracción. Mediante presión se extrae el jugo de caña, se agrega agua caliente a 90°C para extraer el máximo de sacarosa que contiene el material fibroso.

Alcalización. El jugo mezclado se le agrega una lechada de cal para neutralizar el jugo y subir el pH.

Calentadores. Se realiza un calentado secundario de 70 a 80°C posteriormente el jugo se pasa a calentadores primarios donde el jugo se lleva a una temperatura de 100 a 110°C.

Clarificación. El jugo obtenido es colado iniciando la primera etapa de calentamiento facilitando la sedimentación de sólidos insolubles y separándolos del jugo claro que queda en la parte superior del clarificador, los cuales son llevados a los filtros rotatorios al vacío para la recuperación de su contenido de sacarosa.

Evaporación. El jugo claro es enviado a la evaporación para ser concentrado hasta obtener la meladura, la cual es purificada en los clarificadores antes de ser llevada a los tachos.

- Se controla el brix del jugo claro 15 a 17° Bx
- Salida del proceso de evaporación: 64 a 66° Bx
- Se elimina el 90 % de agua
- Se obtiene meladura (jugo concentrado)

Cristalización. Es en los tachos (recipientes al vacío de un solo efecto) donde se produce la masa cocida conformada por cristales de azúcar y miel. El trabajo de cristalización se lleva a cabo empleando el sistema de tres cocimientos para lograr la mayor concentración de sacarosa. Se cristaliza la meladura obtenida de la evaporación.

Centrifugación. La masa cocida pasa a centrífugas de alta velocidad que separaran los cristales de azúcar del licor madre. Durante este proceso, el azúcar es lavado para retirar los residuos de miel.

Secado. El azúcar húmedo es secado en secadores horizontales de aire caliente en contracorriente en contracorriente.

Envasado. Una vez el azúcar esté seco y frío (Pre secado: 85 ° a 90 ° C; Secado: 110° a 120° C), es empacado en sacos de diferentes presentaciones según las necesidades de los clientes nacionales e internacionales listo para su almacenamiento y comercialización del producto terminado.

2.1.1 Los subproductos más importantes del proceso son:

Melaza:

Se utiliza para la elaboración de alcohol y como alimento para los ganados. Se puede obtener de 17 a 32 litros por cada tonelada de caña.

Cachaza:

Es un subproducto que se obtiene de la extracción del jugo y que se utiliza como alimento y como fertilizante (abono orgánico), por cada tonelada de caña se obtiene 0.04 TM.

Bagazo:

Se clasifica en meollo y fibra. La primera se puede hidrolizar y obtener como alimento animal (40% del bagazo) y la segunda se utiliza como combustible (60% del bagazo), o se utiliza el 100% como combustible.

2.2 Descripción del proceso de Cristalización.

La cristalización es un proceso de purificación y separación de un soluto a partir de una solución sobresaturada, mediante la formación de cristales en el seno de la solución, logrando purezas superiores al 99%. Posee gran importancia económica en la industria, ya que requiere mucho menos energía para la separación de lo que utiliza la destilación y otros métodos de purificación comunes; además se puede realizar a temperaturas relativamente bajas y a una escala que varía desde unos cuantos gramos hasta miles de toneladas, mejora la apariencia, y hace más fácil el transporte del sólido.

Los productos obtenidos de la cristalización especialmente por la distribución del tamaño de cristal (DTC). Los cristales se forman cuando la nucleación aparece y entonces crecen. La optimización de los perfiles de temperatura optima permite la exactitud de los modelos matemáticos, que dependen altamente de una adecuada representación de cinéticas de cristalización.

En la industria azucarera en la etapa de cristalización un operador supervisa el proceso, ya sea que trabaje el tacho de manera manual o automática, en Central Potrero por lo regular los tachos de refinó se manejan de manera automática y los de crudo se trabajan manualmente.

La cristalización, es un fenómeno complejo debido a la interrelación de las propiedades de la suspensión a cristalizar y a mecanismos no conocidos totalmente como cinéticas de crecimiento de cristales, nucleación de cristales y atrición. Puesto que el objetivo de control será obtener cristales uniformes del tamaño deseado, es necesario que todas las fuerzas conductoras se mantengan en los rangos estables deseables. Un incremento de la calidad en la industria de procesos y la minimización de costos de producción requiere de la comprensión de cómo obtener una DTC apropiada.

Un cristal es el tipo de materia inanimada más organizada, se caracteriza porque sus partes componentes (átomos o iones) están dispuestas, formando las llamadas redes espaciales. Las distancias interatómicas de un cristal de cualquier material son constantes del mismo.

Ventajas

- El factor de separación es elevado (producto casi sin impureza). En bastantes ocasiones se puede recuperar un producto con una pureza mayor del 99% en una única etapa de cristalización, separación y lavado.
- Controlando las condiciones del proceso se obtiene un producto sólido constituido por partículas discretas de tamaño y forma adecuados para ser directamente empaquetado y vendido (el mercado actual reclama productos con propiedades específicas).
- Precisa menos energía para la separación que la destilación u otros métodos empleados habitualmente y puede realizarse a temperaturas relativamente bajas.

Desventajas

- En general, ni se puede purificar más de un componente ni recuperar todo el soluto en una única etapa. Es necesario equipo adicional para retirar el soluto restante de las aguas madres.
- La operación implica el manejo de sólidos, con los inconvenientes tecnológicos que esto conlleva. En la práctica supone una secuencia de procesado de sólidos, que incluye equipos de cristalización junto con otros de separación sólido – líquido y de secado.

2.1.1 Puntos críticos en la etapa de cristalización

La etapa de cristalización es una parte fundamental que implica diferentes operaciones unitarias que intervienen en el proceso azucarero y se convierte a su vez, en puntos críticos importantes los cuales son variables difíciles de controlar en el proceso a nivel planta piloto y por supuesto, a nivel industrial. Otra variable importante a controlar es la sobresaturación de la miel que se cristalizara en los equipos, si el valor es óptimo en donde la concentración de la solución excede a la concentración de saturación se produce una velocidad de crecimiento alta y una velocidad de nucleación baja lo que beneficia la DTC adecuada.

Sobresaturación de la solución

La cristalización a partir de una solución es un ejemplo de la creación de una nueva fase dentro de una mezcla homogénea. El proceso tiene lugar en dos etapas. La primera de ellas consiste en la formación del cristal y recibe el nombre de nucleación. La segunda corresponde al crecimiento del cristal. El potencial impulsor de ambas etapas es la sobresaturación, de forma que ni la nucleación ni el crecimiento tendrán lugar en una solución saturada o insaturada.

Para que exista la sobresaturación, la solución debe tener una concentración que exceda la concentración de saturación. Esta variación depende de las diferentes zonas de concentración (estable, metaestable y lábil).

Zona metaestable. Próxima a la saturación en donde los cristales crecen, pero no se forman nuevos cristales.

Zona intermedia. En esta puede formarse nuevos cristales y crecen los ya existentes.

Zona lábil. En donde surgen cristales en ausencia de otros, el tachero mantendrá la alimentación de miel de tal manera que la saturación se sitúe dentro de la zona metaestable solo crecerán los cristales sin la formación de nuevos.

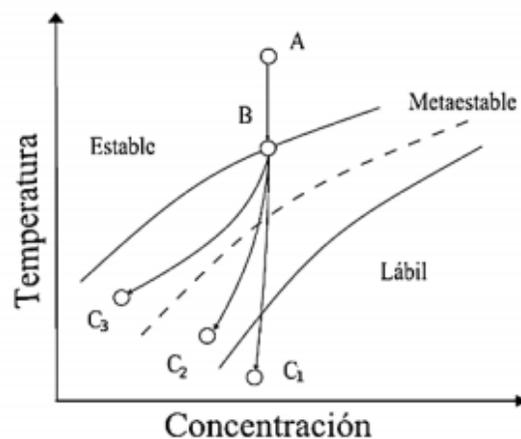


Fig. 3 Zonas de concentración en la etapa de cristalización

La sobresaturación es uno de los elementos importantes de control, sobre la cual recae un gran peso del proceso de la cristalización por lotes de vacío, sin embargo, los datos que se encuentran disponibles, para sacarosa pura, no garantizan que los rangos de operación sean adecuados. Los mecanismos que afectan, principalmente la saturación durante el proceso, son:

- La elevación del punto de ebullición
- La viscosidad
- Las condiciones de vacío
- La temperatura

Para generar la sobresaturación se pueden utilizar tres métodos distintos. Si la solubilidad del soluto aumenta fuertemente con la temperatura, una solución saturada se transforma en sobresaturada y simplemente disminuyendo la temperatura por enfriamiento.

Si la solubilidad es relativamente independiente de la temperatura, la sobresaturación se puede dar evaporando una parte del disolvente. Si tanto el enfriamiento como la evaporación no resultan adecuados, como en el caso de solubilidad elevada, la sobresaturación se puede generar añadiendo un tercer componente. El tercer componente puede actuar físicamente dando lugar a una mezcla con el disolvente original en la que la solubilidad del soluto disminuye bruscamente.

También, si se desea una precipitación prácticamente completa, se puede crear químicamente un nuevo soluto añadiendo un tercer componente que reaccione con el soluto original para formar una sustancia insoluble. Este proceso recibe el nombre de precipitación, los métodos utilizados en análisis cuantitativo constituyen ejemplos típicos de precipitación. Mediante la adición de un tercer componente es posible crear rápidamente sobresaturaciones muy grandes.

- **Coefficiente de Sobresaturación.**

Es la relación que existe entre el peso de la sacarosa % agua contenida en una solución sobresaturada y el peso de sacarosa % agua que debe estar presente en una solución saturada que tiene la misma temperatura y la misma pureza.

$$\frac{\text{Sacarosa \% agua en una solución sobresaturada}}{\text{Sacarosa \% agua en una solución saturada}}$$

Ec.2 Coeficiente de Saturación

Sin sobresaturación no hay cristalización, para alcanzar la sobresaturación se tiene que realizar:

Enfriamiento: si se enfría la solución, ésta pierde solubilidad y pasa de estar concentrada a saturada y finalmente sobresaturada.

Calentamiento: si se calienta la solución se quita solvente y pasa de estar concentrada a saturada y finalmente sobresaturada. Cuando se incrementa la temperatura la solubilidad puede disminuir o aumentar dependiendo del sólido, por ejemplo, en sólidos orgánicos como la urea se disminuye la solubilidad.

Evaporación: Se evapora una parte del disolvente, hasta que la cantidad de sustancia disuelta en la solución restante supere la de saturación. Esta operación básica se emplea en los casos en que la solubilidad depende poco de la T. Un ejemplo aplicado es en la industria para formar sal.

Precipitación: Al colocar una sustancia adicional en la solución para que se aglomeren los sólidos y formar cristales.

Al vacío: Combinación de efectos. En un evaporador al vacío se evapora una parte del disolvente, la eliminación del calor necesario enfría además la solución. Ventajosa para sustancias sensibles a la Temperatura.

Para que los cristales se formen en el licor, es necesario que exista una sobresaturación considerable. La sobresaturación del licor disminuye en la proporción en que los cristales se formen y crecen, para conservar la sobresaturación, es necesario entonces mantener la evaporación del agua y el suministro de material azucarado.

Pureza

Este término se emplea para indicar el contenido de azúcar presente en las soluciones a la entrada o a la salida del cristalizador. El efecto que la pureza tiene sobre la cristalización es de tal importancia que repercute en la calidad del producto terminado, es decir; si la alimentación al tacho se hace con una meladura de pureza baja afecta al proceso debido a que el tiempo de residencia se incrementa pues será necesario elevar esta pureza con evaporación dentro del cristalizador, y esto afectará el costo de producción del producto terminado.

Un cristal en si es muy puro. Sin embargo, cuando se separa del magma final la cosecha de cristales, sobre todo si se trata de agregados cristalinos, la masa de sólidos retiene una cantidad considerable de aguas madres. Por consiguiente, si el producto se seca directamente, se produce una contaminación que depende de la cantidad y del grado de impureza de las aguas madres retenidas por los cristales.

Temperatura

Al aumentar la temperatura durante la operación del tacho, la velocidad de cristalización también aumentara y cuando la temperatura disminuye la velocidad de cristalización se mantiene, aumentando la sobresaturación.

- **Velocidad de cristalización**

La cantidad de azúcar cristalizada por unidad de tiempo y por unidad de superficie de cristales, se conoce como velocidad de cristalización y en sentido práctico va a determinar el buen trabajo de la estación de cristalización y del aprovechamiento de la capacidad instalada de la fábrica

Factores que afectan la velocidad de cristalización, en las masas cocidas depende de:

- La viscosidad, en términos generales es una resistencia al movimiento del líquido.
- La velocidad de cristalización es inversamente proporcional a la viscosidad.

Crecimiento del cristal

Un cristal es el tipo de materia más altamente organizada. En este proceso, el sistema incrementa el orden ya que pasa de un sistema relativamente desordenado (la disolución) a un sistema mucho más ordenado (el cristal). Se caracteriza por el hecho de que sus partículas constituyentes, que pueden ser átomos, moléculas o iones, están dispuestas en formaciones ordenadas tridimensionalmente llamadas redes especiales.

En las cristalizaciones comerciales no solo intensa el rendimiento y la pureza de los cristales, sino también el tamaño y la forma de los mismos. Casi siempre se desea que los cristales tengan tamaño uniforme. La uniformidad del tamaño es indispensable para evitar apelmazamientos en el empaque, para facilitar la descarga, el lavado, el filtrado y para un comportamiento uniforme en su uso.

Nucleación

El fenómeno de la nucleación es esencialmente el mismo para la cristalización a partir de una solución, cristalización a partir de un producto fundido, condensación de gotas de niebla en un vapor sobre-enfriado, y generación de burbujas en un líquido sobrecalentado, en todos los casos, la nucleación se produce como consecuencia de rápidas fluctuaciones locales a escala molecular en una fase homogénea que está en estado de equilibrio metaestable.

La nucleación es la formación de amontonamientos de átomos, moléculas o iones constituyentes de la nueva fase en pequeñas zonas separadas en el interior de la antigua fase. Estos amontonamientos formados por distintas cantidades de partículas crecen y aumentan su volumen, mientras que otros se desmoronan. Puesto que solo una parte de estos amontonamientos alcanzan una dimensión macroscópica, la velocidad del cambio de fase depende del número de partículas capaces de un posterior crecimiento que se formas por unidad de volumen del sistema y por unidad de tiempo.

Esta magnitud se llama velocidad de nucleación. La nucleación es también el proceso menos entendido de los procesos que envuelven a la cristalización y el más difícil para ser descrito por expresiones cinéticas.

Si una solución no contiene partículas sólidas extrañas ni cristales de su propio tipo, el núcleo puede ser formado solo por nucleación homogénea. En la nucleación homogénea, por la solución sobresaturada se forman agregados de iones o de moléculas iguales a los de los núcleos. En la nucleación heterogénea, la formación de los agregados críticos es ayudada por una segunda fase (por ejemplo, por partículas de polvo).

Debido a las fluctuaciones, una unidad cinética individual penetra con frecuencia en el campo de fuerza de otra u las dos partículas se unen momentáneamente, lo normal es que se separen inmediatamente, pero, si se mantienen unidas, se le pueden unir sucesivamente otras partículas. Las combinaciones de este tipo reciben el nombre de agregados. La unidad de partículas, de una en una, a un agregado constituye una reacción en cadena que se puede considerar como una serie de reacciones químicas reversibles de acuerdo con el siguiente esquema:

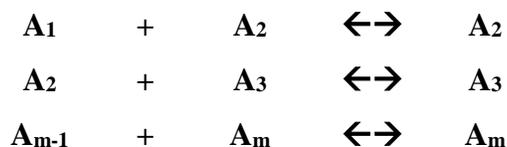


Fig. 4 Combinaciones de la nucleación

Donde \mathbf{A}_1 es la unidad cinética elemental, y el subíndice representa el número de unidades que forman el agregado, cuando m es pequeño, un agregado no se comporta como una partícula que forma una nueva fase con una identidad y límite definidos. al aumentar m , el agregado se puede ya reconocer y recibe el nombre de embrión.



En las reacciones de precipitación analíticas la nucleación homogénea si se da alguna vez, es raramente el mecanismo predominante y solamente tiene lugar cuando la razón de sobresaturación es grande.

2.2 Descripción de los Cristalizadores

El sistema de cristalización que se realiza en área de refino es de 4 templeas es decir se elaboran hasta 4tas cuando es permitido por el color de los materiales. En el área de refino se trabaja con 5 tachos.

Tacho	Templa	Vol.	Área Cal	Área/ Vol.	No. Fluxes	Largo	Diám.
5	1 ^a , 2 ^a , 3 ^a y 4 ^a	1750 ft ³	2491 ft ²	1.42	531	48	4
6	1 ^a , 2 ^a , 3 ^a y 4 ^a	1750 ft ³	2468 ft ²	1.41	526	48	4
7	1 ^a , 2 ^a , 3 ^a y 4 ^a	1750 ft ³	2532 ft ²	1.45	540	48	4
8	1 ^a	1750 ft ³	2541 ft ²	1.45	542	48	4
15	1 ^a	2100 ft ³	4079 ft ²	1.94	1252	42	3.5

Tabla 1. Descripción de medidas tachos de refino

En refino cada templa que se elabora es una cristalización que se realiza, no hay cortes ni pies de templa como el caso de la cristalización de crudo.

En el área de crudo que es donde se realizara la experimentación, cuentan con 10 tachos los cuales trabajan con sistema de 3 templeas, éstas se nombran con letras: Templa de A, B y C, según se el tipo de miel con el que se alimentan.

Tacho	Vol. ft ³	Área Cal ft ²	Fluxes	Diámetro in	Largo in
1	2 500	4 563	1350	3.5	42
2	2 100	4 063	1247	3.5	42
3	2 100	4 083	1253	3.5	42
4	2 100	4 140	1271	3.5	42
6	1 450	2 612	610	4	48
9	2 100	4 104	1260	3.5	42
10	2 100	4 079	1252	3.5	42
11	2 100	4 015	1232	3.5	42
12	2 100	4 063	1247	3.5	42
13	2 300	4 379	1150	4	52
14	2 100	4 063	1247	3.5	42

Tabla 2. Descripción de medidas tachos de crudo



Fig. 5 Tacho Cristalizador

La cristalización se realiza con diferentes mieles según sea el tipo de templa de A, B o C, ya con la carga se concentra este material evaporando el agua sobrante, cuando llega al brix adecuado se introduce el polvo de azúcar para provocar la formación de los cristales de sacarosa que se irán alimentando de las mieles que sea requerido, el crecimiento del cristal es con mayor velocidad por la pureza de las mieles y la baja viscosidad que ayudan a la cristalización.

La tasa de crecimiento de cristales es proporcional a la sobresaturación; por lo tanto, es evidente que debe mantenerse en la zona segura, pero debajo de su límite más alto. El exceso de sobresaturación es el responsable de la formación no deseada del grano fino (junto con la mala circulación) así como de los conglomerados. Después del lavado y centrifugado, estos granos finos son disueltos y devueltos solo para volver a unirse en el proceso de cristalización. Esto resulta en un mayor uso de agua, energía y tiempo, y en una fuerte disminución de la eficiencia en la producción de azúcar. Por lo general solo hay escasa o ninguna información sobre la cantidad de azúcar “reciclada”, aunque es un excelente indicador para el control de calidad.

3. METODOLOGÍA

La experimentación llevada a cabo en el proceso de elaboración de azúcar en el área de crudo del Central el Potrero S.A. de C.V., en tachos cristalizadores de un solo efecto, aplicado a templas de “C”, las cuales sirven como semilla para las templas de “B”.

La cristalización de azúcar a nivel industrial se lleva a cabo por medio de un sistema denominado “sistema de templas”, para el azúcar estándar los cristales se hacen crecer por medio de tres secciones, hasta alcanzar el tamaño adecuado de cristal comercial (1mm). La primera sección en la que se inicia el proceso es la cristalización de “C” que se lleva a cabo por nucleación secundaria, se sobresatura la solución de sacarosa – agua y se inducen núcleos cristalinos o semilla de tamaño promedio de 10 μm ocurriendo una nucleación aparente, por medio de las variables termodinámicas (flujos de vapor y condiciones de vacío) se hace crecer el cristal hasta obtener un tamaño promedio de 230 μm . El cristal que resulta de la cristalización C servirá de núcleo para la cristalización B, y el resultado de la cristalización B será el núcleo de la cristalización A.

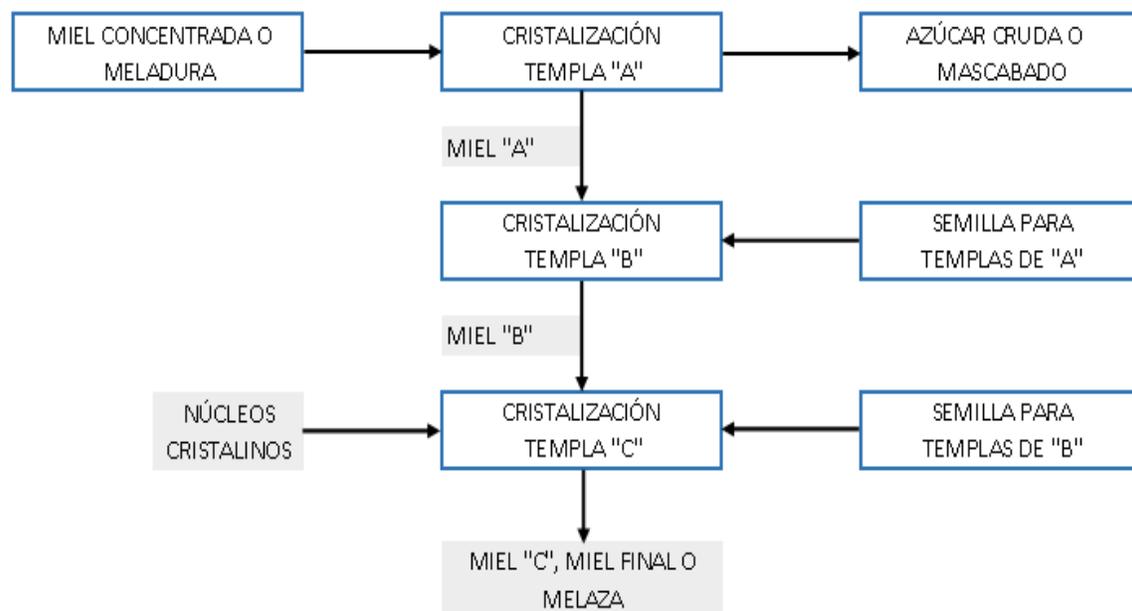


Fig. 6 Proceso Cristalización Área de Crudo

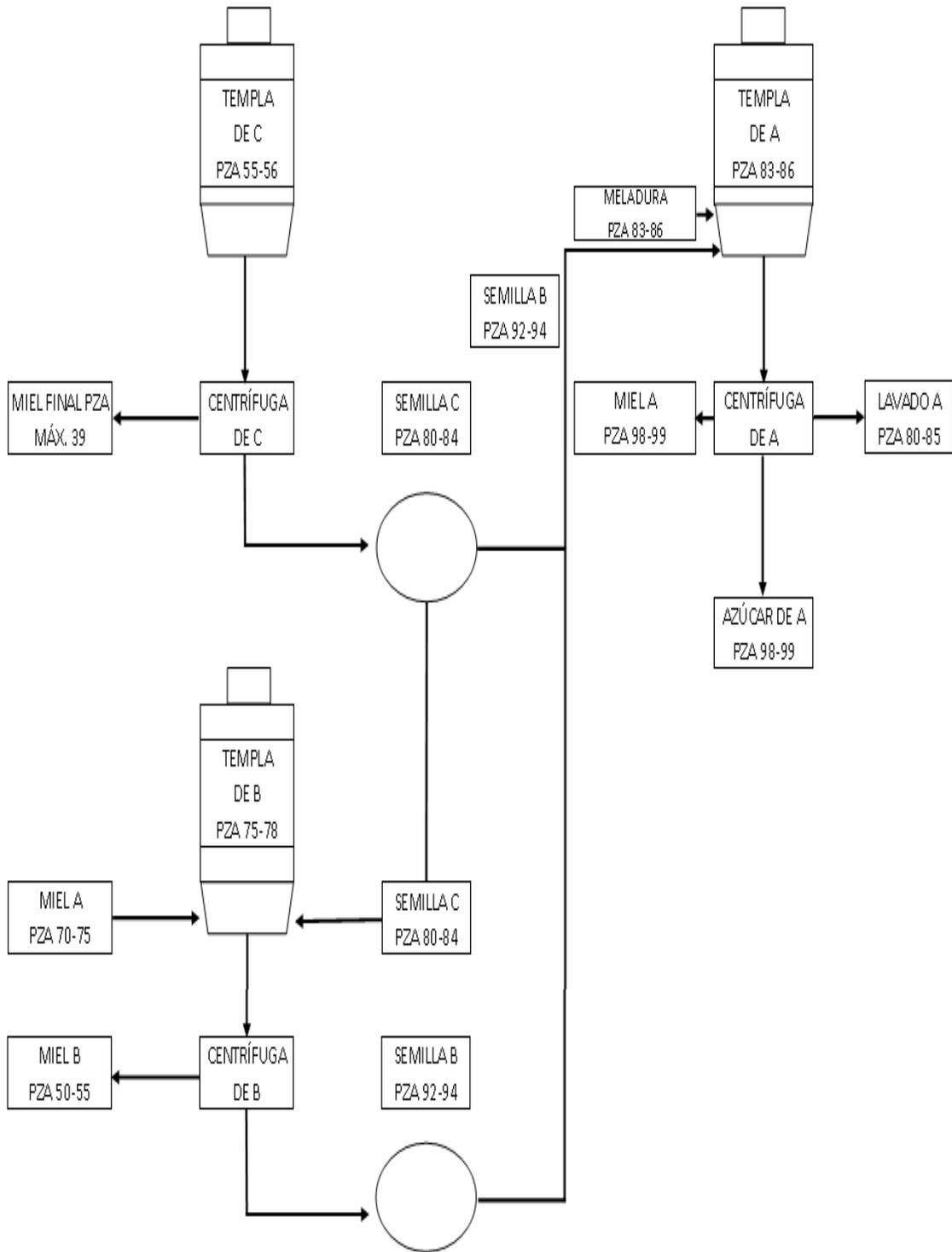


Fig. 7 Sistema de templas área crudo

En el área de refinado, no es necesario re – circular las templas, esto quiere decir que el proceso de cristalización se realiza mediante la alimentación de licor o sirope teniendo un sistema de hasta 4tas templas, la semilla que se utiliza son núcleos cristalinos, los cuales son adquiridos a *Química Lee*.

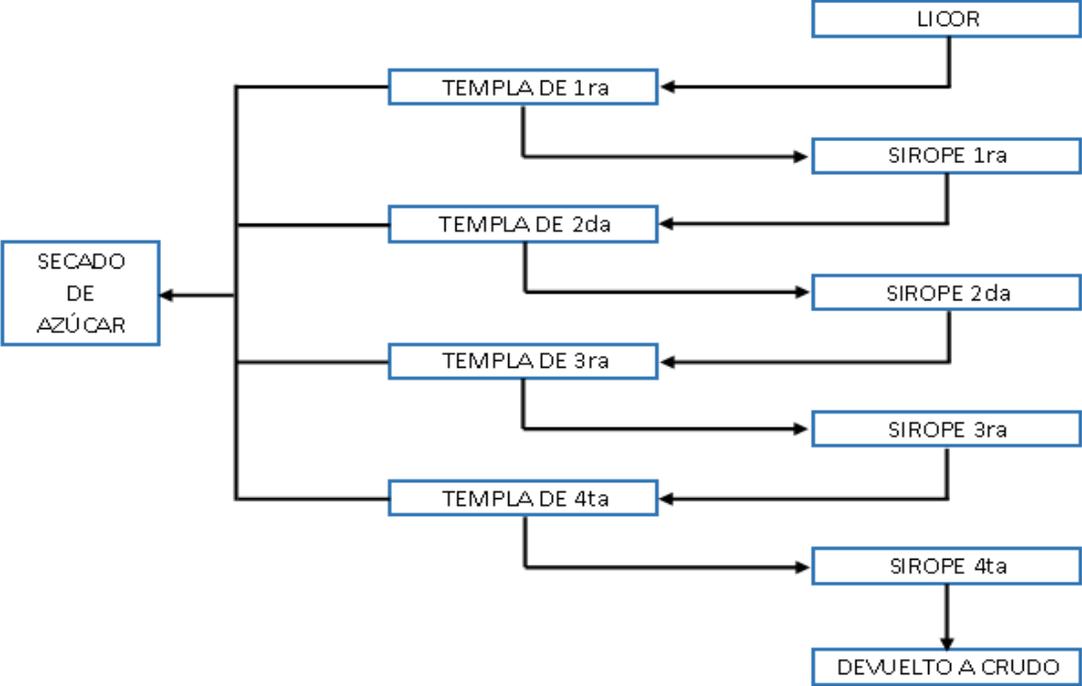


Fig. 8 Diagrama de Cristalización Refino.

Si bien las aguas madre (sirope) funcionan como alimentación para la producción de cada una de las diferentes templas, no quiere decir que se produzca el ensemillamiento, este paso se realiza hasta que cada templa tenga su momento de sobresaturación, en el área de refino es fácil esta etapa, puesto que solo se coloca la semilla en el embudo extractor y se verifica en la pantalla la sobresaturación, no así en el área de crudo, este paso se sigue realizando manualmente quedando a juicio del tachero, la estabilidad de la templa.

3.1 Ficha técnica núcleos cristalinos

Fundamento.

Los núcleos cristalinos dan origen al centro de los cristales en el desarrollo de la cristalización, no formándose nuevos cristales, sino que solamente se desarrollan los que se introducen en el tacho. Al formarse el núcleo toma la forma perfecta del cristal de sacarosa con sus caras bien definidas. El azúcar cristaliza en forma de prismas romboidales oblicuos, del sistema monoclinico. Durante la formación de los núcleos cristalinos no se forman conglomerados ni granos gemelos permitiendo tener mayor superficie por unidad y como consecuencia mayor agotamiento en la miel final.

El ingrediente activo de este producto está aprobado como *Coadyuvante de Elaboración*,

Ingrediente regulado: Alcohol Isopropílico ANEXO X Núm. 39

Propiedades y Especificaciones del Producto

Estado Físico:	Sólido	% Solidos	95 %
Apariencia:	Sólido Pastoso		
Color:	Blanco		
Olor:	Ligero a Alcohol	Presentación	Cubeta de 20 kg,
pH en Solución al 1%:	5 – 7		
Densidad:	0.8 – 1.1 g/cm ³		
Solubilidad en agua:	Completa	Tiempo de caducidad:	12 Meses (a partir de la liberación del producto)

Tabla 3. Ficha técnica núcleos cristalinos

3.2 Análisis de condiciones para la cristalización

En la estancia que se realizó en la fábrica durante la zafra 2016 – 2017, se diagnosticó la dinámica de trabajo actual en el área de cristalización, así como las diferencias que existen en el manejo de los equipos, de acuerdo a criterio de cada una de las personas responsables de la manipulación de los tachos. Se identificaron las variables como son: la tasa de crecimiento de los cristales, concentración de sacarosa y consumo energético, los cuales influyen en la uniformidad del producto.

3.2.1 Cantidad de molienda de caña

Esta variable es importante ya que la producción de bagazo, el cual es utilizado como materia prima para el área de calderas, es de gran importancia y depende significativamente de la cantidad de molienda.

La fábrica debe mantener un equilibrio entre la cantidad de molienda y la cantidad de vapor que produce con el fin de mantener un control en los procesos de evaporación y cristalización en donde el consumo de energía depende significativamente de la producción de los flujos de vapor. Esto se ve reflejado significativamente en el tiempo de cocción de cada templa, puesto que si la presión de vapor es baja y los 5 tachos de refino se encuentran trabajando simultáneamente la presión será aún más escasa, teniendo como resultado tiempo perdido en la cocción, punto final o aflojamiento de la templa.

3.2.2 Flujos de Vapor

El conocimiento de la cantidad y la presión del vapor por los equipos es muy importante en aquellos, en los cuales la transferencia de calor es el punto crítico de sus funciones. Debe existir un equilibrio de la utilización de energía en los equipos más demandantes de energía como lo son los cristalizadores.

3.2.3 Condiciones energéticas en los cristalizadores

Temperatura, condiciones de vacío, presión de vapor, como ya se mencionó, la presión de vapor es importante para la cocción y finalización de las templeas, al igual que la temperatura, ya que si esta no está en su óptimo nivel de trabajo ya sea que sea alta o baja, puede tener severas afectaciones en las características organolépticas de la templa.

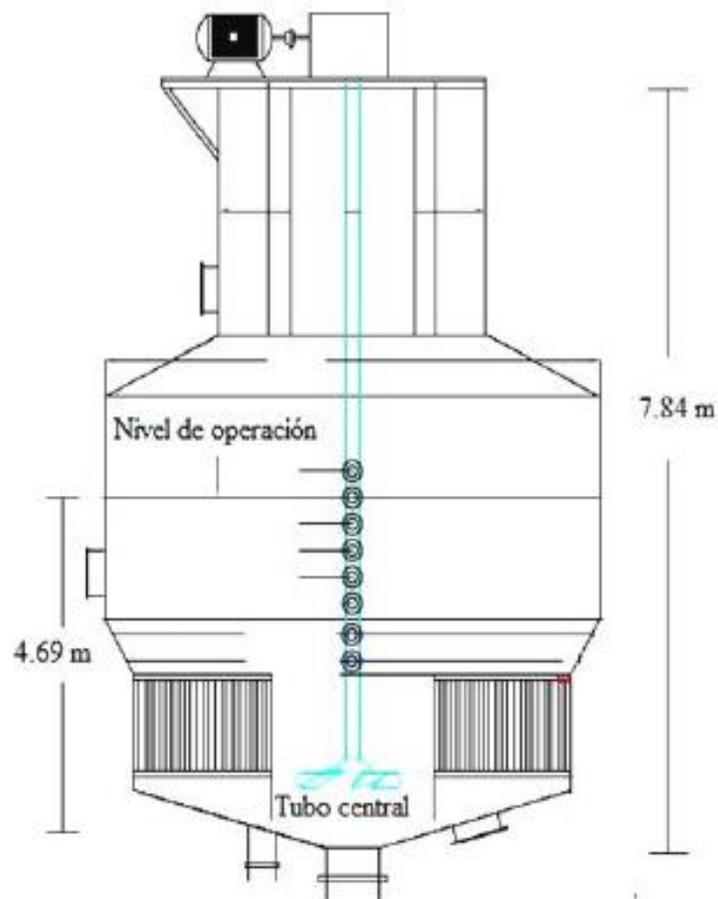


Fig. 8 Cristalizador industrial de sacarosa

3.2.4 Núcleos cristalinos

Los núcleos cristalinos no son más que azúcar refinada, derivados de una molienda especial, logrando de aproximadamente 10 μm . Estos dan origen al centro de los cristales en el desarrollo de la cristalización no formando nuevos cristales, sino estos cristales se desarrollan en el tacho mediante el alimento del licor o sirope. Al formarse el núcleo toma la forma perfecta del cristal de sacarosa con sus caras bien definidas. El azúcar cristaliza en cristalinos, no se forman conglomerados ni granos gemelos, permitiendo tener mayor superficie por unidad y como consecuencia mayor agotamiento en la miel final.

3.2.5 Equilibrio y rendimientos

En el proceso de cristalización, los cristales y las aguas madres permanecen en contacto durante el tiempo suficiente para alcanzar un equilibrio, de forma que las aguas madres están saturadas a la temperatura final del proceso.

El rendimiento de la cristalización se puede calcular a partir de la concentración de la solución original y la solubilidad a la temperatura final. Si se produce una evaporación apreciable durante el proceso es preciso tenerla en cuenta. Cuando la velocidad de crecimiento de los cristales es pequeña, se necesita un tiempo relativamente grande para alcanzar el equilibrio, de forma que la superficie de cristales expuesta a la solución sobresaturada es pequeña. En estos casos, las aguas madres finales pueden contener una considerable sobresaturación y el rendimiento real será menor.

El agotamiento de la miel final es fundamental en esta etapa del proceso, puesto que si la pureza de dicha miel es mayor a 39% indica que existe presencia de miel no cristalizada, esto es, que aún existe presencia de grano que es utilizable para semilla de nuevas plantas.

3.3 Diseño de experimentos

Para la cristalización de las plantas. Se consideran que los factores más importantes para un mejor rendimiento de los cristales.

- Temperatura del interior del tacho cristizador
- Presión de vacío
- Pureza de la miel

Mieles	Meladura	Miel de A	Miel B	Miel final
Pureza	84 – 86 %	70 – 75%	50 – 55%	Máx. 39 %

Azúcares	Azúcar A	Azúcar B	Azúcar C
Pureza	99 – 98%	90 – 94%	80 – 84%

Tabla 4. Purezas de mieles y azúcares crudos

Licores	Promedios de parámetros		
	Brix	Pureza	Sacarosa
Fundido	62.76 %	98.85 %	62.04 %
Clarificado	62.72 %	99.35 %	62.31 %
Refinado	62.82 %	99.51 %	62.51 %

Tabla 5. Valores promedio de licores

Siropes	Promedios de parámetros		
	Brix	Pureza	Sacarosa
1 ra.	77.4 %	95.58 %	69.2 %
2 da.	72.2 %	95.6 %	69.02 %
3 ra.	71.92 %	94.42 %	67.91 %
4 ta.	70 %	65.99 %	94.27 %

Tabla 6. Sistemas medidos en la etapa de cristalización

Tipo de templa	Límites de operación		
	Brix	Pureza	Sacarosa
1 ra.	85 – 90 %	99.5 – 99.9 %	84 – 86 %
2 da.	85 – 90 %	98.5 – 99.4	84 – 86 %
3 ra.	85 – 90 %	97.5 – 98.4 %	84 – 86 %
4 ta.	85 – 90 %	97.5 – 98.4 %	96.5 – 97.5 %

Tabla 7. Valores promedio de siropes

3.4 Factores de estudio

Factores	Nivel	Simbología
Temperatura 1	°C	T1
Temperatura 2	°C	T2
Brix 1	°Bx	B1
Brix 2	°Bx	B2
Pureza de la miel 1	%	P1
Pureza de la miel 2	%	P2

Tabla 8. Factores de estudio

Combinación de los niveles de los factores del proceso de cristalización

No.	Tratamientos
1	T1 B1 P1
2	T1 B1 P2
3	T1 B2 P1
4	T1 B2 P2
5	T2 B1 P1
6	T2 B2 P1
7	T2 B1 P2
8	T2 B2 P2

Tabla 9. Combinación de tratamientos

Para el presente proyecto se utilizará un diseño completamente al azar con arreglo factorial A x B x C donde A es la temperatura de cocción, B son los °Bx y C pureza de la miel.

Características del diseño experimental

- Repeticiones 2
- Tratamiento 8
- Unidades experimentales 16

Se aplicó un diseño experimental con el que se quiere conocer cuál de las 3 variables afecta más a la etapa de cristalización, esto con el fin de mejorar la de mayor afectación.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La velocidad de crecimiento de un cristal es conocida como velocidad de cristalización. La cristalización puede ocurrir solo con soluciones sobresaturadas.

El crecimiento ocurre primero con la formación del núcleo, y luego con su crecimiento gradual. En concentraciones arriba de la sobresaturación, la nucleación es concebida como espontánea, y rápida.

MASA COCIDA			
Enero			
Semana	Temperatura	Pureza	Brix
1	59	88.01	90.60
2	62	87.86	90.67
3	60	86.75	90.98
4	62	86.63	90.90

Tabla 10. Determinación de Temperatura, Pureza y Brix de masa cosida mes Enero.

MASA COCIDA			
Febrero			
Semana	Temperatura	Pureza	Brix
1	57	87.56	90.79
2	55	88.10	90.81
3	60	88.14	90.82
4	66	87.24	90.86

Tabla 11. Determinación de Temperatura, Pureza y Brix de masa cosida mes Febrero.

MASA COCIDA			
Marzo			
Semana	Temperatura	Pureza	Brix
1	62	88.10	90.70
2	65	87.00	90.95
3	58	87.52	90.47
4	60	88.15	90.57

Tabla 12. Determinación de Temperatura, Pureza y Brix de masa cosida mes Marzo.

4.1 Determinación de los factores del proceso de cristalización.

Los factores que se presentan en tablas fueron monitoreados por 3 meses sacando un promedio diario, el monitoreo se realizó en la terminación de cada templa elaborada en el primer turno, esto se hizo solo en templeas de “A”.

Mes	Temperatura	Brix	Pureza
Enero	65	90.50	85.68
	62	90.96	85.91
	62	90.40	87.89
	61	91.48	84.51
	64	90.12	89.78
	59	90.32	87.71
	63	90.04	89.89
	56	90.28	88.64
	68	90.14	89.38
	63	90.48	86.75
	62	90.22	88.20
	63	90.08	89.11
	64	89.96	89.71
	61	91.14	84.73
	59	90.60	87.88
	56	90.50	88.96
	60	90.60	87.78
	62	90.48	89.21
	61	90.60	88.07
	59	90.08	87.80
	63	90.74	87.32
	56	90.96	86.79
	68	90.72	89.33
	63	89.28	90.99
	62	90.12	89.09
	63	90.48	87.37
	64	90.94	88.07
	61	91.14	89.20
	60	91.76	88.67
	58	90.54	86.35
61	91.74	88.07	

Tabla 13. Resultados del monitoreo de cristalización mes Enero.

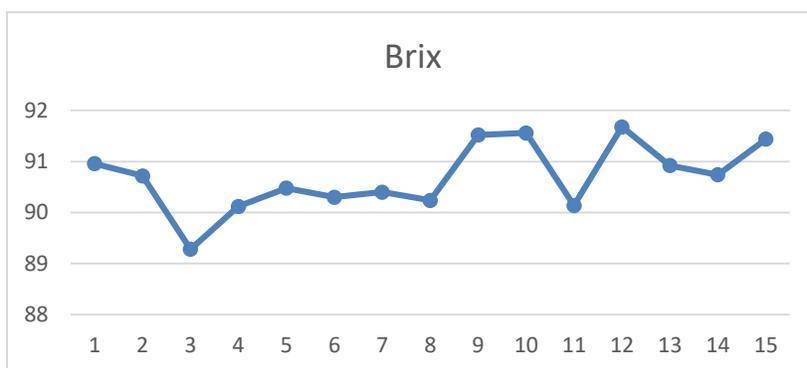
Mes	Temperatura	Brix	Pureza
Febrero	56	90.56	86.11
	68	90.80	85.17
	63	90.08	89.50
	62	91.24	84.07
	63	90.32	87.46
	64	91.44	84.33
	61	90.48	86.09
	59	90.28	88.03
	56	91.48	84.20
	60	91.12	84.35
	62	89.76	90.84
	61	91.72	83.98
	59	90.64	85.47
	60	90.30	88.53
	61	90.40	87.26
	59	90.24	88.15
	62	91.52	89.12
	63	91.56	86.69
	62	91.40	89.03
	65	91.74	89.79
	66	91.12	88.17
	59	90.92	86.14
	55	90.76	89.13
	59	90.94	89.89
	68	90.74	90.45
	58	91.34	90.88
	63	91.00	86.38
	62	91.20	88.72

Tabla 14. Resultados del monitoreo de cristalización mes Febrero.

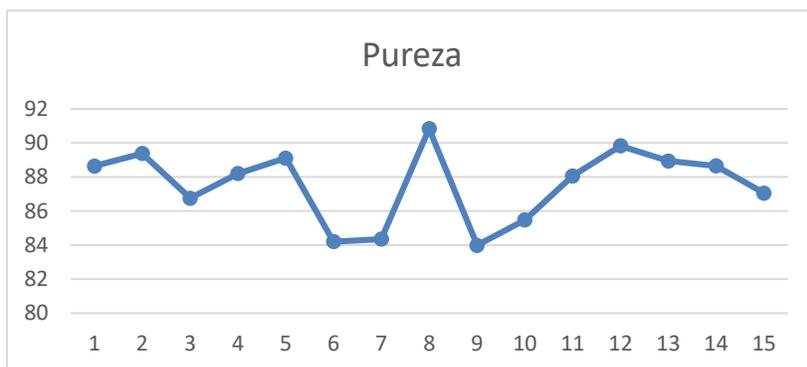
Mes	Temperatura	Brix	Pureza
Marzo	62	90.76	85.87
	62	90.52	86.28
	64	90.08	89.03
	59	90.14	89.41
	62	90.56	86.64
	58	90.16	90.02
	60	90.36	87.18
	61	90.44	86.32
	65	90.84	85.60
	59	90.04	89.40
	60	90.10	89.68
	58	90.28	88.06
	63	90.24	89.83
	59	90.20	88.94
	62	90.32	88.65
	61	90.60	87.05
	58	90.22	89.10
	63	90.56	87.82
	65	91.88	85.17
	66	90.92	86.45
	59	90.52	87.89
	58	90.60	87.32
	60	90.14	89.19
	61	91.68	85.73
	62	90.92	86.97
	59	90.74	87.95
	55	91.44	88.58
	59	90.96	89.03
	62	91.74	89.94
	61	91.16	85.16
60	91.32	87.89	

Tabla 15. Resultados del monitoreo de cristalización mes Marzo.

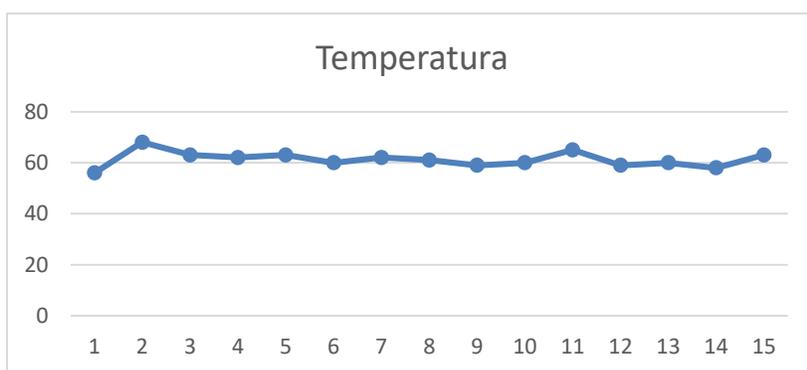
A continuación, se muestran gráficas del comportamiento de Temperatura, Brix y Pureza.



Gráfica 1. Comportamiento Brix Enero – Marzo



Gráfica 2. Comportamiento Pureza Enero – Marzo



Gráfica 3. Comportamiento Temperatura Enero – Marzo

Como se muestra en las gráficas la temperatura, a pesar de tener variaciones debido a que en ocasiones existe variación de presión de vapor en los tachos, es de las tres variables la más estable.

4.2 Análisis estadístico de las variables de estudio.

De acuerdo al análisis de varianza realizado, se obtiene lo siguiente:

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	F	P
Temperatura (A)	1	0.01778	0.01778	0.60	0.461
Brix (B)	1	0.04694	0.04694	1.58	0.244
Pureza (C)	1	8.20823	8.20823	276.80	0.000
A x B	1	0.17222	0.17222	5.81	0.043
A x C	1	0.00360	0.00360	0.12	0.737
B x C	1	0.06934	0.06934	2.34	0.165
A x B x C	1	0.09100	0.09100	3.07	0.118
Error	8	0.23723	0.02965		
Total	15	8.84635			

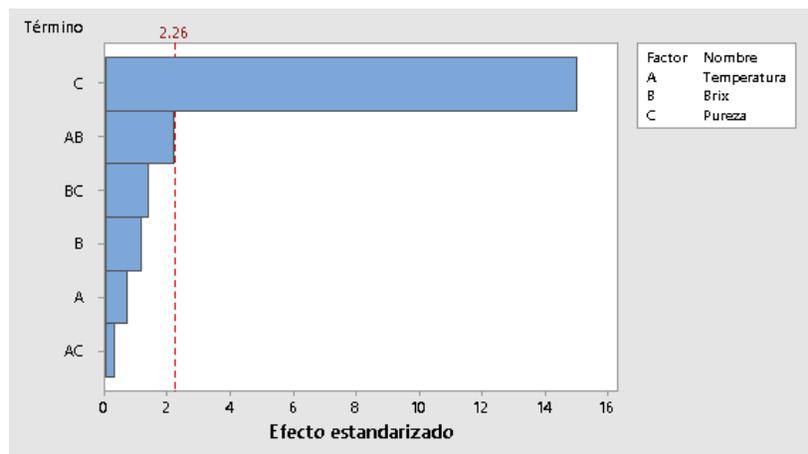
Tabla 16. Análisis de varianza para la concentración (°Bx)

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	F	P
Temperatura (A)	1	0.0102	0.0102	1.25	0.295
Brix (B)	1	0.0060	0.0060	0.74	0.415
Pureza (C)	1	20.0018	20.0018	2468.19	0.000
A x B	1	0.0761	0.0761	9.39	0.015
A x C	1	0.0001	0.0001	0.01	0.920
B x C	1	0.0214	0.0214	2.64	0.143
A x B x C	1	0.0161	0.0161	1.99	0.196
Error	8	0.0648	0.0081		
Total	15	20.1965			

Tabla 17. Análisis de varianza para la pureza

Como se puede observar en ambos análisis del ANOVA realizado teniendo un $\alpha = 0.05$ la pureza tiene mayor significancia en cuanto a la cristalización se refiere, quedando como segundo término la concentración de los grados brix.

- **Gráfica comparativa de las variables de estudio**



De acuerdo a la gráfica comparativa de todos los tratamientos, la pureza es la variable que mayor impacto tiene en la cristalización de azúcar de caña, teniendo como segundo término a la combinación que hay entre temperatura y grados brix.

Para que no exista tanta variación respecto a la pureza, se deben monitorear factores como el pH, y que el porcentaje de la Pol sea bueno, para que la concentración de sólidos solubles tampoco afecte la cristalización.

5. CONCLUSIONES

Como se pudo observar mediante la gráfica y los análisis estadísticos aplicados a las tres variables estudiadas, la temperatura es la que menor afectación causa en la cristalización de las templeas, al realizar la comparación, se tiene que la pureza es la variable de mayor afectación, la concentración de grados brix en las templeas, queda en segundo término, teniendo en cuenta que también causa afectación cuando no se logra mantener constante dentro de los parámetros establecidos en la etapa de concentración de la masa.

Si bien con los estudios realizados, podemos concluir que la pureza es la que causa mayor afectación en la cristalización, debemos tener en cuenta que existen otras variables de suma importancia que puede llegar a afectar este proceso, dentro de estas, se encuentra la presión de vapor, que no es más que el vapor que se introduce a los tachos cristalizadores para el calentamiento de los mismos, si la presión es baja las templeas tardan más tiempo en cocerse, en cambio se mantiene estable, el proceso de cristalización se mantendrá en condiciones óptimas.

Esta variable no fue tomada en cuenta en esta experimentación puesto que, no depende directamente del área de elaboración (cristalización), sino del área de calderas, sabiendo que, si la molienda baja o no se muele, no abra bagazo, el cual es la materia prima para las calderas.

6. RECOMENDACIONES

Controlar el nivel de sobresaturación correspondiente a bajas velocidades de formación de núcleos.

Remover el exceso de núcleos tan pronto como sea posible después de su formación.

Minimizar la nucleación secundaria manteniendo la entrada de energía mecánica y el frotamiento de cristales tan bajo como sea posible.

Mantener una densidad del magma tan alta como sea posible, en general mientras mayor es la densidad del magma, mayor es el tamaño promedio de los cristales.

Que los tachos de crudo, se modifiquen para tener una manipulación automática, ya que, entre la descarga y carga de cada templa, se pierde tiempo considerable.

Que los coladores de agua, se modifiquen o se retiren definitivamente, con el fin de evitar una limpieza, puesto que la hojarasca taponea estos coladores no permitiendo el calentamiento de los tachos.

7. BIBLIOGRAFÍA

- BIOTECNOLOGÍA INDUSTRIAL*. (s.f.). Obtenido de
<http://procesosbio.wikispaces.com/Cristalizaci%C3%B3n>
- GEANKOPLIS, C. J. (1998). *PROCESOS DE TRANSPORTE Y OPERACIONES UNITARIAS*. CONTINENTAL.
- HONING, P. (1998). *PRINCIPIOS DE TECNOLOGIA AZUCARERA*.
- HUGOT, E. (1995). *MANUAL PARA INGENIEROS AZUCAREROS*.
- J.C.A, I. (1992). *INTRODUCCION DEL CRISTALIZADOR CONTINUO EN TEMPLAS DE ALTA PUREZA* . INSTITUTO MEXICANO DE INGENIEROS QUIMICOS.
- J.C.P., C. (2010). *MANUAL DE AZUCAR DE CAÑA*. En C. M.. MÉXICO, DF.: LIMUSA.
- MONTGOMERY, D. C. (2004). *DISEÑO Y ANÁLISIS DE EXPERIMENTOS*. LIMUSA S.A. DE C.V.
- OPERACIONES UNITARIAS*. (2010). Obtenido de
<http://operacionesunitariaspcga.blogspot.mx/2010/08/cristalizacion.html>
- REIN, P. (s.f.). *INGENIERIA DE LA CAÑA DE AZUCAR*. BARTENS.
- TEXTOS CIENTIFICOS*. (2015). Obtenido de
<https://www.textoscientificos.com/quimica/cristales/cristalizadores>