



Validación de la correlación del coeficiente de sobresaturación sobre los principales indicadores de desempeño en la etapa de cocimiento en el proceso de producción de azúcar.

Natalia Calle Fajardo

Informe de práctica empresarial para optar por el título de: Ingeniera Química

Asesores

Diego Fernando Mendoza Muñoz, PhD Ingeniería Química

Juan Gabriel Rodríguez Sarasty, MsC Ingeniería Química

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería
Ingeniería Química
Medellín, Antioquia, Colombia
2024

| Cita | Calle Natalia [1] |
|---|---|
| Referencia Estilo IEEE (2020) | [1] N. Calle Fajardo, “Validación de la correlación del coeficiente de sobresaturación sobre los principales indicadores de desempeño en la etapa de cocimiento en el proceso de azúcar.”, Informe práctica profesional, Ingeniería Química, Universidad de Antioquia, Medellín, Antioquia, Colombia, 2024. |



Centro de Documentación Ingeniería (CENDOI)

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Dedicatoria

En primer lugar, le dedico este logro a la fuerza superior que me ha permitido llegar a este punto y que de alguna u otra manera me mantiene de pie.

A mi mamá, ma, esto es por y para ti porque por ti soy lo que soy y espero que la vida me alcance para agradecerte todo.

A mi papá, por mostrarme siempre la importancia del trabajo, a mis hermanas que son mi mayor fuente de inspiración.

También se lo dedico a Natalia la que está escribiendo esto, a la que decidió iniciar esta carrera y a la que no se rindió a pesar de todo, ¡lo lograste!

Agradecimientos

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a las personas que me apoyaron en este trayecto, los que me acompañaron el tiempo que la vida lo permitió y a los que todavía permanecen a mi lado. Agradezco a toda mi familia por siempre creer en mí, incluso más de lo que yo misma lo hago, a mis amigos por escucharme cuando más lo necesitaba, en especial a Laura Morales por ser simplemente ella y ofrecerme siempre su ayuda, aunque no entendiera lo que estudiaba.

Gracias a Cenicaña por permitirme tener mi primera experiencia laboral y ofrecerme la práctica completa que siempre quise, en especial al ingeniero Juan Gabriel Rodríguez por su paciencia, al ingeniero Andrés Felipe Ospina por su motivación, a las ingenieras María Fernanda y Karin, gracias por su guía. A todos mis compañeros de arañas, gracias por los momentos y experiencias compartidas.

TABLA DE CONTENIDO

| | |
|--|----|
| I. RESUMEN | 9 |
| II. ABSTRACT..... | 10 |
| III. INTRODUCCIÓN | 11 |
| IV. OBJETIVOS | 12 |
| Objetivo general | 12 |
| Objetivos específicos..... | 12 |
| V. MARCO TEÓRICO..... | 12 |
| Proceso de producción de azúcar. | 12 |
| Fundamentos de la cristalización. | 14 |
| Indicador clave de desempeño. | 15 |
| VI. METODOLOGÍA | 16 |
| 1. Revisión de antecedentes donde se relacione el coeficiente de sobresaturación con los KPI's 16 | |
| 2. Selección y evaluación de escenarios experimentales. | 16 |
| 2.1. Especificación y definición de los factores utilizados para la selección del ingenio piloto. | 16 |
| 2.2. Especificación del peso relativo de cada factor, en términos de porcentaje. | 17 |
| 3. Análisis y validación de la correlación entre los valores del coeficiente de sobresaturación y los KPI's. | 20 |
| 3.1. Cálculo del coeficiente de sobresaturación..... | 20 |
| 3.2. Indicadores energéticos. | 21 |
| 3.3. Agotamiento de mieles.[1] | 21 |
| 3.4. Contenido de cristal.[1] | 21 |

| | |
|----------------------------------|----|
| 3.5. Porcentaje de cristal. | 21 |
| 3.6. Tiempo de templa..... | 22 |
| VII. RESULTADOS..... | 22 |
| VIII. DISCUSIÓN..... | 29 |
| IX. CONCLUSIONES | 32 |
| X. RECOMENDACIONES..... | 33 |
| REFERENCIAS | 34 |

LISTA DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1 Matriz de selección | 18 |
| Tabla 2 Resultados de °Brix y pureza muestras de masa..... | 22 |
| Tabla 3 Resultados de °Brix y pureza muestras de miel..... | 23 |
| Tabla 4 Resultados parámetros para cálculo del coeficiente de sobresaturación..... | 24 |
| Tabla 5 Coeficiente de sobresaturación de cada muestra tomada..... | 24 |
| Tabla 6 Resultados consumo de agua total en las plantas evaluadas..... | 25 |
| Tabla 7 Resultados de agotamiento y contenido de cristal en las plantas evaluadas..... | 25 |
| Tabla 8 Tiempo de planta..... | 26 |
| Tabla 9 Resultados cristalografía..... | 26 |
| Tabla 10 Variables de control, plantas evaluadas | 28 |

LISTA DE IMÁGENES

| | |
|---|----|
| Imagen 1 Proceso de producción de azúcar, ingenio dual [2]..... | 13 |
| Imagen 2 Curva de solubilidad[1]..... | 15 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 Resultados tamaño y porcentaje de cristal, templa 1 | 27 |
| Figura 2 Resultados tamaño y porcentaje de cristal, templa 2 | 27 |
| Figura 3 Resultados tamaño y porcentaje de cristal, templa 3 | 28 |

I. RESUMEN

En la industria azucarera colombiana, garantizar la calidad del producto final es esencial y exige un control riguroso en todas las etapas del proceso de producción. Este estudio se centra en la etapa de cocimiento, crucial para la formación de cristales de azúcar. El objetivo principal es validar la correlación entre el coeficiente de sobresaturación y los indicadores de desempeño durante esta etapa. La metodología empleada incluyó una revisión exhaustiva de antecedentes, revelando una falta de estudios que evalúen de manera integral tanto el desempeño energético como el global del proceso de cocimiento, además de contar con pocos seguimientos en refinерías.

El Ingenio Riopaila Castilla fue seleccionado como el piloto del estudio, evaluando una estación de cocimiento en su área de refinерía. Se llevaron a cabo tres templeas: uno manual y dos con control de sobresaturación. Se tomaron muestras de slurry, licor, pie de templa, masa cocida y miel Nutsch para analizar parámetros como °Brix, pureza y contenido de cristal. Los resultados obtenidos indican que el coeficiente de sobresaturación afecta significativamente los indicadores clave de desempeño, como el consumo de vapor y el agotamiento. Se identificaron patrones y tendencias que permiten reconocer oportunidades de mejor en el control del proceso, mejorando la eficiencia y la calidad del producto final. Se recomienda continuar con estudios que integren más variables y escenarios para fortalecer las conclusiones y ampliar la comprensión del proceso de cocimiento de refinерía.

Palabras clave

Cristalización, KPI, coeficiente de sobresaturación, templa, cocimiento.

II. ABSTRACT

In the Colombian sugar industry, ensuring the quality of the final product is essential and requires rigorous control at all stages of the production process. This study focuses on the boiling stage, crucial for the formation of sugar crystals. The primary objective is to validate the correlation between the supersaturation coefficient and performance indicators during this stage. The methodology involved a thorough review of previous research, revealing a lack of studies that comprehensively evaluate both the energy performance and the overall boiling process, along with few follow-ups in refineries.

The Ingenio Riopaila Castilla was selected as the pilot site for the study, assessing a boiling station in its refinery area. Three boils were conducted: one manual and two with supersaturation control. Samples were taken from slurry, liquor, bottom of the boil, massecuite, and Nutsch honey to analyze parameters such as °Brix, purity, and crystal content. The results indicate that the supersaturation coefficient significantly affects key performance indicators, such as steam consumption and exhaustion. Patterns and trends were identified, allowing for the recognition of opportunities for process control improvement, thus enhancing efficiency and the final product quality. It is recommended to continue with studies that integrate more variables and scenarios to strengthen the conclusions and broaden the understanding of the refinery boiling process.

Keywords

Crystallization, KPI, supersaturation coefficient, boil, boiling stage.

III. INTRODUCCIÓN

En la industria azucarera colombiana, asegurar la calidad del producto final es una prioridad, lo que requiere eficacia y control en todas las etapas del proceso de producción. Esto es esencial para cumplir con los exigentes estándares de calidad del mercado. Entre las diversas etapas del proceso, la estación de cocimiento se destaca como una de las más importantes, donde de manera general la meladura clarificada se concentra mediante la evaporación de agua, dando lugar a la formación de cristales de azúcar a partir de un cristal semilla en equipos conocidos como tachos. La forma en que se cristaliza el azúcar puede determinar y alterar su pureza, color y textura, factores que son determinantes en la aceptación del producto por parte del consumidor.

En este contexto, es crucial enfocarse en la comprensión de este proceso para lograr un rendimiento óptimo en la producción; existen diversos parámetros relacionados con el estudio de la cristalización, tanto condiciones operativas como variables fundamentales. Uno de estos parámetros destacados es el coeficiente de sobresaturación, el cual indica la medida en que una solución se encuentra saturada con respecto a un compuesto específico, como el azúcar en este caso. Resulta fundamental mantener este coeficiente dentro de un rango óptimo, generalmente entre 1.0 y 1.2, para asegurar una cristalización eficaz y de alta calidad.

Operar por fuera del rango óptimo del coeficiente de sobresaturación genera un proceso de cristalización deficiente, ya que puede provocar la formación de falso grano, cristales conglomerados o variaciones significativas en el tamaño promedio del cristal de azúcar. Estas implicaciones pueden hacer necesario el ingreso de agua adicional para eliminar el falso grano, lo que incrementa el consumo de vapor debido a la evaporación del agua extra. Si los cristales no alcanzan el tamaño deseado, esto puede llevar a su reproceso, disminuyendo la capacidad de producción durante un turno de operación. Además, el tamaño inadecuado de los cristales puede provocar el taponamiento en las cestas de las centrifugadoras, afectando aún más la eficiencia del proceso. En general, cuando el coeficiente de sobresaturación se encuentra fuera del rango óptimo, es posible que se generen afectaciones que impliquen reprocesos, con el consiguiente aumento en el consumo de recursos.[1]

IV. OBJETIVOS

Objetivo general

Validar la correlación del coeficiente de sobresaturación sobre los indicadores de desempeño en la etapa de cocimiento del proceso de producción de azúcar.

Objetivos específicos

- Evaluar la correlación entre el coeficiente de sobresaturación y los indicadores de desempeño energético.
- Evaluar la correlación del coeficiente de sobresaturación y el agotamiento de mieles.
- Analizar el impacto del coeficiente de sobresaturación sobre los tiempos de cocimiento y la velocidad de cristalización.

V. MARCO TEÓRICO

Proceso de producción de azúcar.

La agroindustria azucarera de Colombia se basa principalmente en la transformación de la caña para la producción de azúcar comercial, sin embargo, existen los denominados ingenios azucareros duales los cuáles cuentan con etapas adicionales para la producción de etanol. En ambos procesos la caña de azúcar como materia prima es sometida a diferentes procesos fisicoquímicos con el fin de extraer la mayor cantidad de sacarosa.

En la Imagen 1, se muestra el proceso de producción para un ingenio azucarero dual; en este proceso industrial la materia prima es la caña de azúcar, planta compuesta aproximadamente por un 15% fibra y un 75% jugo, el cual se constituye por 70% agua y 15% sólidos solubles, donde un 13% es sacarosa. Estas condiciones varían significativamente de un área a otra dependiendo de la variedad, factores climáticos, prácticas de cultivo, duración del periodo de crecimiento entre otros. De manera general, el proceso en fábrica comienza con la extracción del jugo el cual se clarifica para eliminar impurezas. Posteriormente, el jugo se concentra mediante evaporación y se somete a cocimiento en tachos, donde se lleva a cabo la cristalización de la sacarosa, formando cristales de azúcar; tras esta etapa, se separan los cristales de azúcar mediante centrifugación, finalmente, los cristales de azúcar se secan y envasan para su distribución y venta.[1]

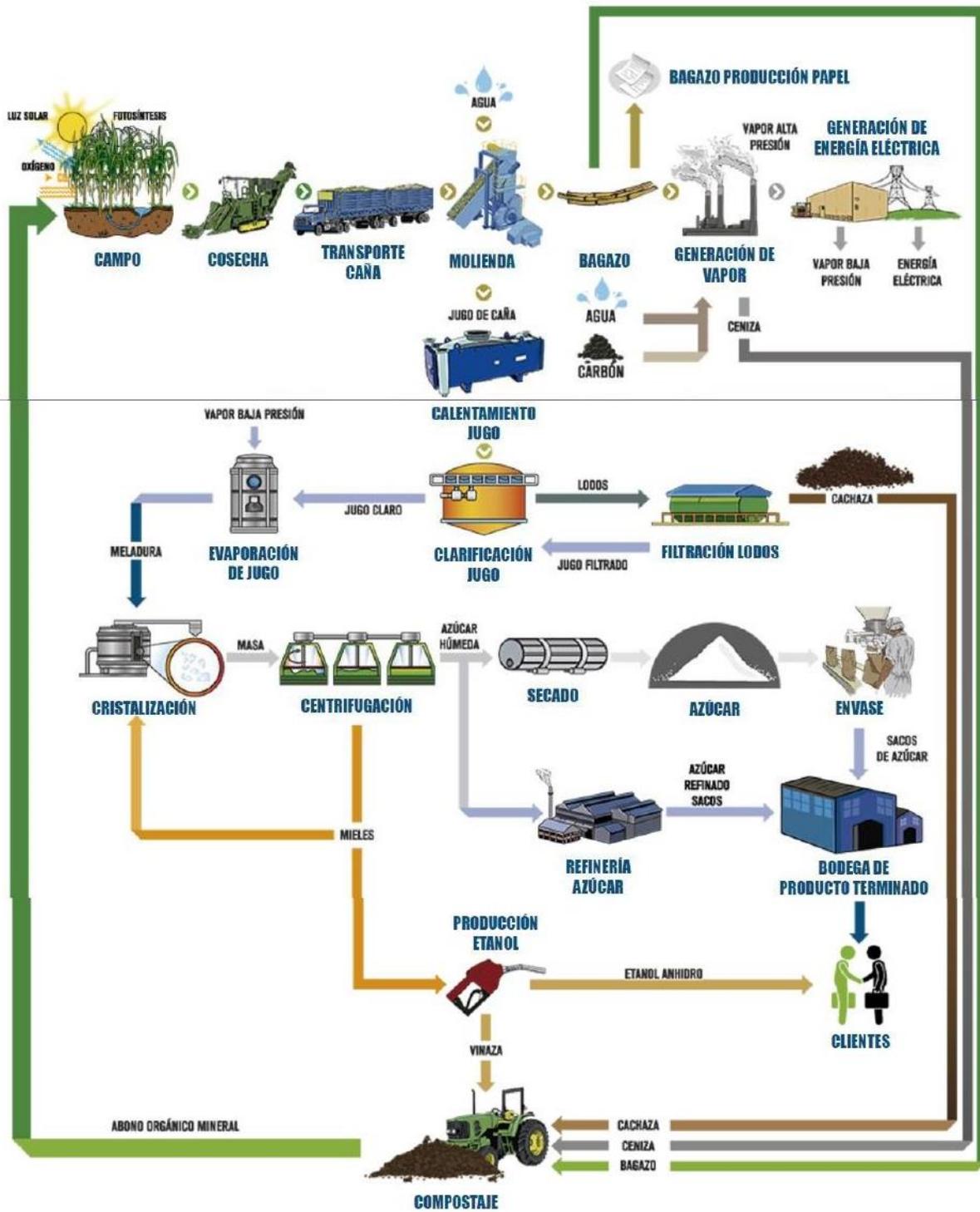


Imagen 1 Proceso de producción de azúcar, ingenio dual [2]

Fundamentos de la cristalización.

La cristalización es un proceso de separación mediante el cual una sustancia o varias pasan de un estado líquido o gaseoso a una fase sólida cristalina; la principal ventaja de este proceso es la capacidad de alcanzar sustancias de alta pureza en una sola etapa.[3]

Para cristalizar la sacarosa se requiere elevar su concentración por encima de aquella correspondiente a una solución saturada es decir llegar a una condición sobresaturada, y llevarla en forma regulada y con precisión a la concentración requerida para lograr la cristalización deseada. [1]

La sobresaturación es la fuerza que impulsa el crecimiento de los cristales y la velocidad de cristalización depende de esta función multivariable y de distintos parámetros; si la sobresaturación cae fuera del límite, los cristales dejarán de crecer, pero si el nivel de sobresaturación aumenta demasiado, se formarán nuevos cristales espontáneamente.

Para determinar si la solución es sobresaturada o no, se debe conocer el grado de sobresaturación el cual se expresa mediante el coeficiente de sobresaturación y se obtiene al dividir la relación sacarosa/agua de la solución sobresaturada entre la relación sacarosa/agua de una solución saturada a iguales condiciones de temperatura y pureza; si se obtiene un valor menor a uno la solución es no saturada, igual a uno saturada y mayor a uno sobresaturada.[1]

En la Imagen 2 se presenta el comportamiento de la solubilidad de soluciones puras de sacarosa respecto a la temperatura, donde el estado de saturación está representado por la curva $y_p = 1$, la región metaestable, delimitada por un coeficiente de sobresaturación entre 1.0-1.2, es en la cual los cristales de azúcar crecen sin que se produzca nucleación de nuevos granos de azúcar, por ende, esta es la región donde la cristalización debe ser efectuada.[1] La nucleación espontánea da como resultado cristales de baja calidad de forma y tamaño irregulares que requieren reprocesamiento.[4]

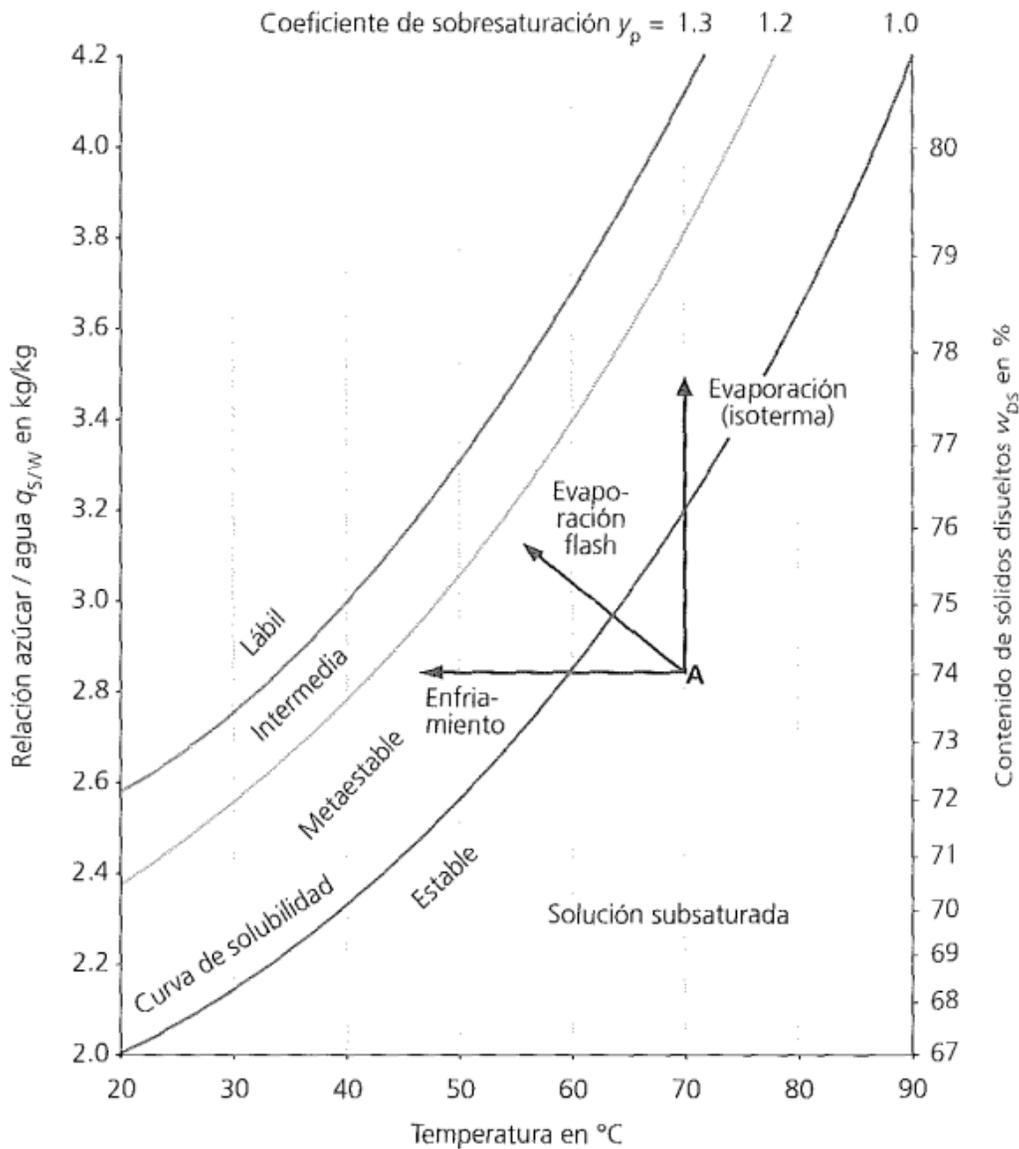


Imagen 2 Curva de solubilidad[1]

Indicador clave de desempeño.

Un indicador clave de desempeño, KPI por sus siglas en inglés, son valores cuantitativos que pueden ser medidos, comparados y/o monitoreados, con el fin de exponer el desempeño de los procesos y trabajar en estrategias de mejora.[5]

Para este proyecto se determinarán los KPI, de la estación de cocimiento que permitan entender el funcionamiento de esta con el fin de lograr una mayor eficiencia en el proceso; se definirán los siguientes indicadores; consumo de vapor, desempeño energético mediante los factores de Van Hengel, agotamiento de mieles, tiempo de cocimiento y velocidad de cristalización.

VI. METODOLOGÍA

Este trabajo se desarrolla como complemento al proyecto realizado por Cenicaña, titulado "Estrategias de operación, control y alternativas tecnológicas para asegurar la eficiencia en la estación de cristalización." A continuación, se describen las etapas desarrolladas.

1. Revisión de antecedentes donde se relacione el coeficiente de sobresaturación con los KPI's

En la etapa 1 de la metodología, se llevó a cabo una exhaustiva revisión bibliográfica de los diferentes seguimientos realizados por Cenicaña a distintos ingenios azucareros. Los resultados de esta revisión revelaron varias áreas de interés y carencias en los estudios existentes. En primer lugar, se observó que no se han realizado seguimientos compuestos que evalúen tanto el desempeño energético como el desempeño global del proceso de cocimiento, lo que indica una brecha en las prácticas actuales. Además, los seguimientos en las refinerías han sido escasos, limitando el entendimiento completo de los procesos en esta etapa crítica.

Para los indicadores energéticos, es crucial conocer la cantidad de agua evaporada y, de ser posible, medir el agua adicionada en cada templa. En el proceso de cristalización en las refinerías de azúcar, se evalúa una templa principalmente por el contenido de cristales finales, más que por el agotamiento, debido a la alta pureza de los materiales. El tiempo de cocimiento de una templa depende del tipo de vapor calefactor utilizado, los materiales iniciales de la templa y el estado global del equipo.

En el sector existen tanto tachos continuos como de tipo batch, y en estos la velocidad de cristalización puede asociarse al porcentaje y cantidad de cristal a lo largo de la templa. Para determinar el tamaño y el porcentaje de cristal, se utiliza el software desarrollado por Cenicaña, denominado CeniCristal. Estos hallazgos proporcionan un panorama integral sobre las prácticas actuales y destacan áreas que requieren mayor atención y desarrollo en el seguimiento de ingenios.

2. Selección y evaluación de escenarios experimentales.

La determinación del ingenio piloto se realiza mediante una matriz de selección, la cual permite evaluar y comparar distintos ingenios en función de criterios clave. A continuación, se presenta el modelo para la matriz de selección con los criterios establecidos y su ponderación.

2.1. Especificación y definición de los factores utilizados para la selección del ingenio piloto.

1. Tipo de cocimiento: Se refiere a las diferentes formas o grados de concentración que se logran según el tipo de azúcar que se desee obtener; este factor se analizará, según la

disponibilidad de material, facilidad de acceso al equipo y a sus muestreadores. los tipos de cocimientos disponibles para estudio son:

- Cocimiento de masa A
 - Cocimiento de masa B
 - Cocimiento de semilla
 - Cocimiento en refinería.
2. Solicitud del ingenio: Con este factor se valora si el ingenio ha solicitado específicamente un servicio de Cenicaña relacionado al estudio del tema de sobresaturación.
 3. Tecnología por evaluar: En este factor se considera evaluar los tipos de tecnología conocidos en el sector para llevar a cabo un cocimiento, las tecnologías reconocidas son tachos batch o continuos.
 4. Disponibilidad del personal en el ingenio: Evalúa la disponibilidad y disposición del personal para colaborar durante el estudio.
 5. Actividad industrial durante el momento de la evaluación: Considera la actividad industrial en el momento de la evaluación para asegurar que el ingenio esté en condiciones operativas que permitan un seguimiento representativo.
 6. Etapa del cocimiento a evaluar: Define en qué etapa del proceso de cocimiento se centrará la evaluación, por ejemplo, pie de templa, semillamiento o todo el proceso de cristalización.

2.2. Especificación del peso relativo de cada factor, en términos de porcentaje.

Se define una escala de calificación de 0-100 para cada uno de los factores, siendo el valor mínimo 10 y el valor máximo 90. Es importante mencionar que los porcentajes seleccionados fueron propuestos de forma propia, tuvieron una primera revisión y corrección por parte de un profesional en ingeniería química encargado de realizar la experimentación en el ingenio y después revisados nuevamente por el ingeniero químico líder del proyecto “Estrategias de operación, control y alternativas tecnológicas para asegurar la eficiencia en la estación de cristalización.”.

1. Tipo de cocimiento: la puntuación considera la relevancia del tipo de cocimiento en relación con los objetivos del estudio; se le otorga una calificación del 10%.
2. Solicitud del ingenio: la puntuación considera el nivel de prioridad con el que debe atenderse la solicitud en caso de existir o de lo contrario el proceso de solicitud de instalaciones e inmediatez con la que se puede llevar a cabo la evaluación; se le otorga una calificación del 40%.

3. Tecnología por evaluar: la puntuación considera la innovación o relevancia de la tecnología en el contexto de estudio y si se ha realizado anteriormente seguimientos con ese tipo de tecnología, se otorga una calificación de 10%.
4. Disponibilidad del personal en el ingenio: la puntuación mide la facilidad de acceso y apoyo del personal durante el estudio, se otorga una calificación de 10%.
5. Actividad industrial durante el momento de la evaluación: la puntuación valora la estabilidad operativa del ingenio durante el estudio, se otorga una calificación de 15%.
6. Etapa del cocimiento a evaluar: la puntuación considera la relevancia de la etapa para los objetivos del estudio, se otorga una calificación de 15%.

La puntuación total se determina como la sumatoria del producto entre la puntuación de cada criterio por su peso correspondiente.

A partir de lo anterior se realiza la selección del ingenio piloto:

Tabla 1 Matriz de selección

| Criterio | Puntuación [%] | Ingenio 1 (Providencia) | Ingenio 2 (Riopaila Castilla) |
|-----------------|-----------------------|--------------------------------|--------------------------------------|
| 1 | 10 | 5 | 5 |
| 2 | 40 | 1 | 9 |
| 3 | 10 | 6 | 3 |
| 4 | 10 | 7 | 7 |
| 5 | 15 | 6 | 6 |
| 6 | 15 | 9 | 9 |
| Total | 100 | 34 | 39 |

Considerando los resultados de la tabla 1, se determina que el ingenio piloto en el cual se llevará a cabo el estudio será el Ingenio 2 (Riopaila Castilla, planta Castilla); esta selección cuenta con las siguientes características; se evaluará por solicitud del ingenio una estación de cocimiento del área de refinería, con el objetivo principal de validar el impacto del control por sobresaturación implementado en los tachos de refinería; con esto, se desarrollarán los objetivos propuestos en este proyecto.

Para esto se propone llevar a cabo un seguimiento de las diferentes corrientes de ingreso hacia el tacho seleccionado con el objetivo de supervisar el proceso de cocimiento. Para asegurar la representatividad de los valores obtenidos, se plantea realizar 3 cocimientos, se evalúa una templa de forma manual y dos templeas haciendo uso del sistema de control de sobresaturación

implementado. A continuación, se presenta la forma en la que se realiza el muestreo de los materiales de proceso.[6]

- Slurry: Se obtiene una muestra de 10ml de slurry, por cada templa. Esta debe ser visualizada por medio del microscopio para determinar el tamaño inicial de cristal con el que se llevará a cabo la templa, mediante el uso de CeniCristal.
- Licor: Dado que se trata de un flujo constante de entrada al tacho, se ha establecido que se debe tomar una muestra cada 30 minutos para asegurar que sea representativa. Se estima que cada cocimiento dura aproximadamente 4 horas, durante las cuales se recogerán alrededor de 8 muestras, cada una de aproximadamente 500 ml. Estas muestras se combinarán para formar una muestra compuesta, la cual debe ser analizada mediante mediciones de grados Brix y pureza.
- Pie de templa: Se debe tomar una muestra de pie de templa antes de llegar al brix de semillamiento, a esta muestra se le analizará °Brix y pureza, además de ser caracterizada mediante CeniCristal.
- Masa cocida: Se deben muestrear 2 litros de masa cocida aproximadamente cada 30 minutos y realizar mediciones de grados brix y pureza. Además, se debe determinar el tamaño de cristal y contenido de cristal en cada muestra con el uso de CeniCristal.
- Miel Nutsch: Se debe filtrar aproximadamente 1 litro de masa cocida, para obtener la miel respectiva de esa muestra; esto se hace mediante el uso de un filtro Nutsch ubicado en el ingenio; la muestra debe ser analizada mediante mediciones de grados brix y pureza.
- Consumo de agua: Con el uso de un equipo medidor de flujo ultrasónico, Panametrics, se realiza la medición de la cantidad de agua que ingresa al tacho durante el cocimiento.

Adicional a lo anterior se debe registrar las siguientes variables de control durante el seguimiento:

- Presión de vacío,
- Temperatura del cuerpo.
- Presión del vapor.
- Temperatura de vapor.
- Nivel.
- Brix de la masa.
- Temperatura de las muestras recolectadas.

La metodología explicada anteriormente será ejecutada por 1 profesional de Cenicaña, 1 profesional en formación y adicional se solicita el apoyo de 3 personas del ingenio, (1 para muestreo en el tacho, 1 para análisis en laboratorio de calidad y 1 para análisis en cristalografía).

3. Análisis y validación de la correlación entre los valores del coeficiente de sobresaturación y los KPI's.

3.1. Cálculo del coeficiente de sobresaturación.

Para realizar el análisis correspondiente es necesario conocer cómo se determina el coeficiente de sobresaturación, a continuación, se explica el modelo de cálculo el cual se realiza a partir de los datos obtenidos de °Brix y pureza de las muestras de miel.[7]

Sacarosa en miel:

$$S = \frac{^{\circ}Brix}{100} \cdot Pureza \quad (1)$$

Contenido de agua:

$$W = 100 - ^{\circ}Brix \quad (2)$$

Contenido de impurezas:

$$I = 100 - S - W \quad (3)$$

Relación sacarosa/agua:

$$S/W = \frac{S}{W} \quad (4)$$

Relación impurezas/agua:

$$I/W = \frac{I}{W} \quad (5)$$

Solubilidad:

$$C_{S,P} = 64.397 + 0.07251 \cdot T + 0.0020569 \cdot T^2 - 9.035 \times 10^{-6} \cdot T^3 \quad (6)$$

Coficiente de saturación, sustancia pura.

$$SW_{sat,P} = \frac{C_{S,P}}{100 - C_{S,P}} \quad (7)$$

Coficiente de solubilidad.

$$SC = 1 - 0.088 \cdot (I/W) \quad (8)$$

Coficiente de saturación, sustancia impura.

$$SW_{sat,IMP} = SW_{sat,P} \cdot SC \quad (9)$$

Coficiente de sobresaturación.

$$SSC = \frac{S/W}{SW_{sat,IMP}} \quad (10)$$

Es fundamental aclarar que, al calcular el coeficiente de sobresaturación de una sustancia de alta pureza, no se recomienda utilizar los modelos empleados para calcular el coeficiente de solubilidad y de saturación de sustancias impuras ya que estos modelos se basan en diferentes supuestos, como la relación entre impurezas, agua y la cantidad de azúcares reductores presentes, los cuáles son casi nulos en este tipo de materiales. Por lo tanto, al trabajar con sustancias de elevada pureza, el coeficiente de sobresaturación debe calcularse como si se tratara de una sustancia pura, utilizando la siguiente ecuación.

$$SSC = \frac{S/W}{SW_{sat,P}} \quad (11)$$

3.2. Indicadores energéticos.

Los indicadores energéticos en la estación de tachos están relacionados a determinar el consumo de vapor durante el cocimiento; esta aproximación se hará mediante el análisis del consumo de agua durante el cocimiento, para las tres plantas analizadas. El consumo de agua será medido con un Panametrics TransPort PT900 el cual es un medidor de flujo ultrasónico portátil.

3.3. Agotamiento de mieles.[1]

El agotamiento se determina a partir de las purzas de masa cocida y miel, mediante la siguiente ecuación.

$$Agotamiento = 100 \cdot \frac{100(P_{Masa} - P_{Miel})}{P_{masa}(100 - P_{Miel})} \quad (12)$$

Donde:

P_{Masa} → Pureza de la masa

P_{Miel} → Pureza de la miel

3.4. Contenido de cristal.[1]

El contenido de cristal se determina a partir de la siguiente ecuación.

$$w_{Cr} = 100 \cdot \frac{(P_{Masa} - P_{Miel})}{(100 - P_{Miel})} \quad (13)$$

3.5. Porcentaje de cristal.

El porcentaje de cristal en una masa se determina con la siguiente ecuación.

$$\%C = \frac{((100 \cdot Bx_{Masa}) - (100 \cdot Bx_{Miel})) \cdot 100}{(100 - Bx_{Miel})(Bx_{Masa})} \quad (14)$$

Donde :

Bx_{Masa} → °Brix de la masa

Bx_{Miel} → °Brix de la miel

3.6. Tiempo de templa.

A partir de la etapa 1 de la metodología llevada a cabo se ha encontrado que el tiempo de templa en una estación de refinería es alrededor de 2.5h a 3.5h.

A lo largo del desarrollo del proyecto, se procederá a analizar el comportamiento de los indicadores clave de rendimiento (KPI's) evaluados a lo largo de la templa, con el objetivo de identificar patrones, tendencias o variaciones significativas. Este análisis permitirá no solo observar la evolución de los KPI's, sino también determinar si existe alguna correlación directa o indirecta entre estos y el coeficiente de sobresaturación, un parámetro crítico en el proceso de cristalización. La intención es identificar si los cambios en el coeficiente de sobresaturación tienen un impacto claro sobre los KPI's, lo que ayudaría a optimizar el control del proceso. Además, se buscará establecer recomendaciones sobre límites operativos adecuados para mejorar la eficiencia, así como identificar prácticas recientes que representen oportunidades de mejora, promoviendo así ajustes que contribuyan a la optimización del rendimiento de la operación.

VII. RESULTADOS

En la siguiente tabla se reportan los resultados obtenidos de °Brix y pureza para las muestras de masa tomadas en cada templa evaluada

Tabla 2 Resultados de °Brix y pureza muestras de masa.

| Nro.Templa/ Nro.Muestra | °Brix | Pureza |
|------------------------------------|--------------|---------------|
| T1M1 | 79.26 | 99.36 |
| T1M2 | 83.58 | 98.91 |
| T1M3 | 86.22 | 98.68 |
| T1M4 | 88.44 | 99.05 |
| T2M1 | 79.14 | 98.88 |
| T2M2 | 82.14 | 98.69 |
| T2M3 | 80.76 | 99.49 |

| | | |
|------|-------|-------|
| T2M4 | 82.92 | 98.65 |
| T2M5 | 82.80 | 98.48 |
| T2M6 | 86.04 | 98.71 |
| T3M1 | 80.34 | 99.25 |
| T3M2 | 80.40 | 98.97 |
| T3M3 | 82.32 | 99.20 |
| T3M4 | 76.86 | 98.04 |
| T3M5 | 76.80 | 97.91 |
| T3M6 | 78.84 | 97.88 |
| T3M7 | 84.30 | 98.25 |

En la siguiente tabla se reportan los resultados obtenidos de °Brix y pureza para las muestras de miel tomadas en cada templa evaluada.

Tabla 3 Resultados de °Brix y pureza muestras de miel

| Nro.Templa/ Nro.Muestra | °Brix | Pureza |
|------------------------------------|--------------|---------------|
| T1M1 | 80.00 | 99.27 |
| T1M2 | 77.00 | 98.78 |
| T1M3 | 78.00 | 97.65 |
| T1M4 | 74.00 | 97.47 |
| T2M1 | 81.00 | 99.20 |
| T2M2 | 78.00 | 98.44 |
| T2M3 | 78.00 | 98.29 |
| T2M4 | 79.00 | 98.56 |
| T2M5 | 79.00 | 98.12 |
| T2M6 | 76.00 | 97.37 |
| T3M1 | 80.00 | 97.90 |
| T3M2 | 79.00 | 98.37 |
| T3M3 | 79.00 | 98.60 |
| T3M4 | 79.00 | 97.90 |
| T3M5 | 79.00 | 98.09 |
| T3M6 | 78.00 | 97.57 |
| T3M7 | 75.00 | 97.15 |

En las siguientes tablas se reportan los resultados de los parámetros y coeficientes necesarios para el cálculo del coeficiente de sobresaturación.

Tabla 4 Resultados parámetros para cálculo del coeficiente de sobresaturación

| Nro.Templa/ Nro.Muestra | Sacarosa en miel (S) | Contenido de agua (W) | Contenido de impurezas (I) | Relación sacarosa/agua (SW) | Temperatura [°C] | Solubilidad (C _{s,p}) | Coeficiente de saturación, sustancia pura (S _{wsat,p}) |
|----------------------------|-------------------------|-----------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|---------------------|------------------------------------|---|
| T1M1 | 79.42 | 20.00 | 0.58 | 3.97 | 64.10 | 75.12 | 3.02 |
| T1M2 | 76.06 | 23.00 | 0.94 | 3.31 | 61.10 | 74.45 | 2.91 |
| T1M3 | 76.17 | 22.00 | 1.83 | 3.46 | 67.00 | 75.77 | 3.13 |
| T1M4 | 72.13 | 26.00 | 1.87 | 2.77 | 64.60 | 75.23 | 3.04 |
| T2M1 | 80.35 | 19.00 | 0.65 | 4.23 | 60.90 | 74.40 | 2.91 |
| T2M2 | 76.78 | 22.00 | 1.22 | 3.49 | 64.60 | 75.23 | 3.04 |
| T2M3 | 76.67 | 22.00 | 1.33 | 3.48 | 65.40 | 75.41 | 3.07 |
| T2M4 | 77.87 | 21.00 | 1.13 | 3.71 | 69.70 | 76.38 | 3.23 |
| T2M5 | 77.52 | 21.00 | 1.48 | 3.69 | 70.20 | 76.50 | 3.26 |
| T2M6 | 74.00 | 24.00 | 2.00 | 3.08 | 64.40 | 75.18 | 3.03 |
| T3M1 | 78.32 | 20.00 | 1.68 | 3.92 | 62.30 | 74.71 | 2.95 |
| T3M2 | 77.71 | 21.00 | 1.29 | 3.70 | 67.50 | 75.88 | 3.15 |
| T3M3 | 77.90 | 21.00 | 1.10 | 3.71 | 68.00 | 76.00 | 3.17 |
| T3M4 | 77.34 | 21.00 | 1.66 | 3.68 | 68.10 | 76.02 | 3.17 |
| T3M5 | 77.49 | 21.00 | 1.51 | 3.69 | 68.70 | 76.16 | 3.19 |
| T3M6 | 76.10 | 22.00 | 1.90 | 3.46 | 69.00 | 76.23 | 3.21 |
| T3M7 | 72.86 | 25.00 | 2.14 | 2.91 | 61.70 | 74.58 | 2.93 |

En la siguiente tabla se reporta el valor del coeficiente de sobresaturación para cada muestra tomada en las diferentes templas evaluadas.

Tabla 5 Coeficiente de sobresaturación de cada muestra tomada.

| Nro.Templa/ Nro.Muestra | Coeficiente de sobresaturación (CSS) | Estadísticos | |
|----------------------------|--|--|----------------------|
| T1M1 | 1.32 | Promedio Desviación estándar CV [%] | 1.12 0.16 14.6 |
| T1M2 | 1.10 | | |
| T1M3 | 1.15 | | |
| T1M4 | 0.92 | | |
| T2M1 | 1.46 | | |
| T2M2 | 1.15 | | |

| | | | |
|------|------|--|------|
| T2M3 | 1.14 | Promedio Desviación estándar CV [%] | 1.17 |
| T2M4 | 1.15 | | 0.15 |
| T2M5 | 1.13 | | 12.5 |
| T2M6 | 1.02 | | |
| T3M1 | 1.33 | | |
| T3M2 | 1.18 | | |
| T3M3 | 1.17 | Promedio Desviación estándar CV [%] | 1.15 |
| T3M4 | 1.16 | | 0.10 |
| T3M5 | 1.16 | | 0.09 |
| T3M6 | 1.08 | | |
| T3M7 | 0.99 | | |

En la siguiente tabla se reporta el valor de consumo de agua durante las templas evaluadas.

Tabla 6 Resultados consumo de agua total en las templas evaluadas.

| Nro. Templa | Flujo volumétrico | |
|------------------------------|--------------------------|------------------------|
| | gpm | m³/h |
| 1 | 1070 | 243 |
| 2 | 1010 | 229 |
| 3 | No hubo consumo de agua | |

En la siguiente tabla se reportan los resultados representativos de agotamiento y contenido de cristal en cada templa.

Tabla 7 Resultados de agotamiento y contenido de cristal en las templas evaluadas

| Nro. Templa | Agotamiento [%] | Contenido de cristal [%] |
|------------------------------|----------------------------------|---|
| 1 | 62.86 | 62.26 |
| 2 | 51.53 | 50.86 |
| 3 | 39.29 | 38.6 |

En la siguiente tabla se reporta el tiempo de cada templa evaluada.

Tabla 8 Tiempo de templa

| Nro.Templa | Tiempo de cocimiento [h] |
|-------------------|---------------------------------|
| 1 | 2:50:00 |
| 2 | 3:15:00 |
| 3 | 3:22:00 |

En las siguientes tablas se reporta el tamaño de cristal a lo largo de la templa y su respectivo coeficiente de variación, estos resultados se obtuvieron con el software CeniCristal.

Tabla 9 Resultados cristalografía.

| Nro.Templa/Nro.Muestra | Tamaño cristal promedio [μm] | CV [%] |
|-------------------------------|---|---------------|
| T1M1 | 213.8 | 29.9 |
| T1M2 | 287.1 | 39.4 |
| T1M3 | 312.7 | 36.3 |
| T1M4 | 386.8 | 38.9 |
| T2M1 | 123.5 | 31.4 |
| T2M2 | 226.1 | 29.5 |
| T2M3 | 282.4 | 36.4 |
| T2M4 | 331.7 | 39.1 |
| T2M5 | 441.6 | 33.1 |
| T2M6 | 441.5 | 41.0 |
| T3M1 | 168.7 | 30.7 |
| T3M2 | 206.0 | 27.7 |
| T3M3 | 281.3 | 32.8 |
| T3M4 | 306.2 | 34.1 |
| T3M5 | 403.3 | 38.7 |
| T3M6 | 388.6 | 34.7 |
| T3M7 | 367.4 | 35.1 |

En las siguientes figuras se presenta el comportamiento de tamaño y porcentaje de cristal a lo largo de la templa con relación al coeficiente de sobresaturación en cada evaluación.

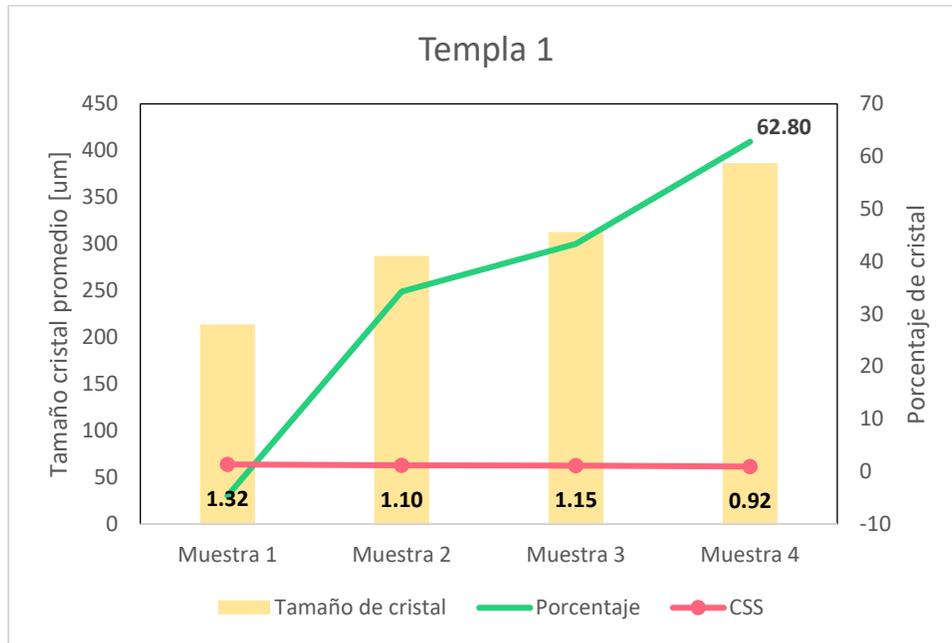


Figura 1 Resultados tamaño y porcentaje de cristal, templa 1

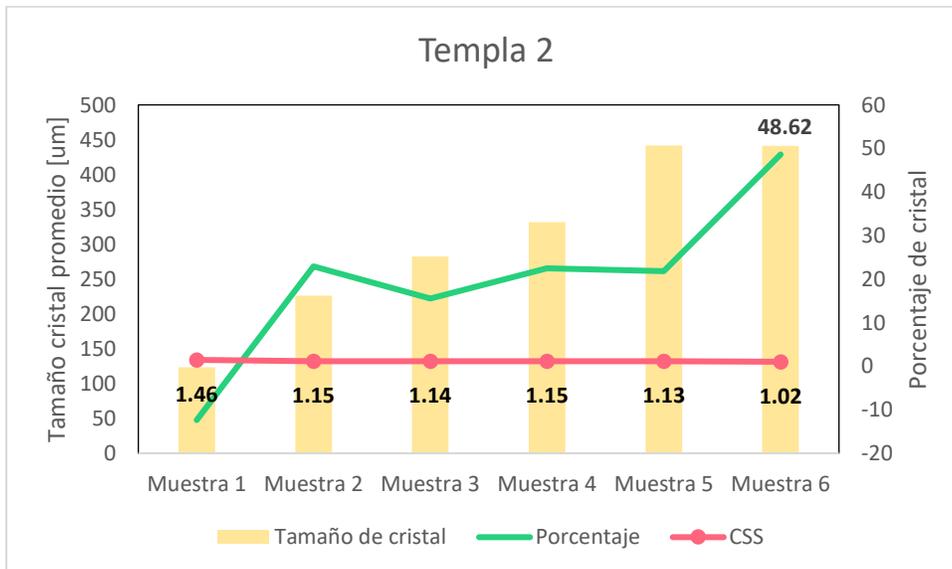


Figura 2 Resultados tamaño y porcentaje de cristal, templa 2.

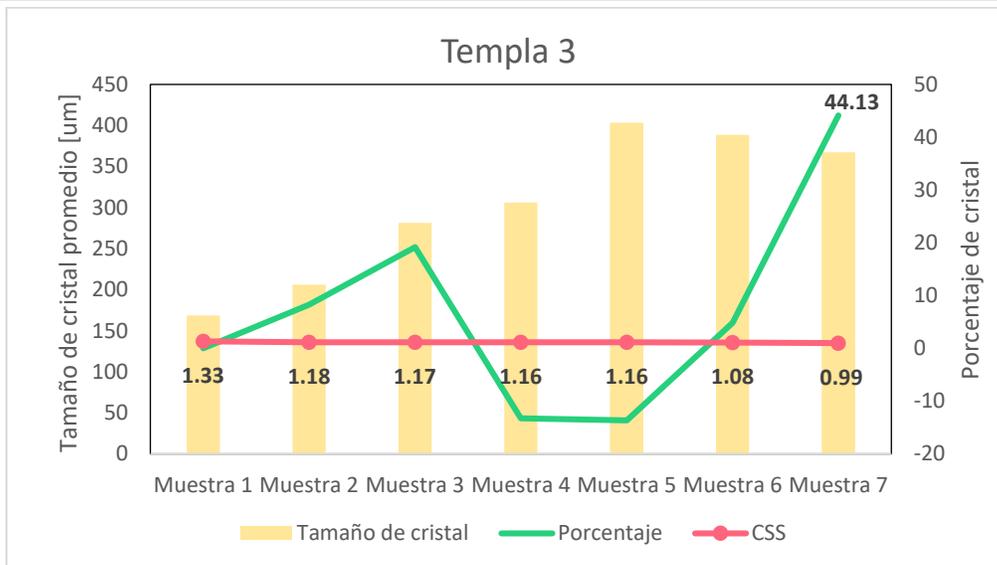


Figura 3 Resultados tamaño y porcentaje de cristal, templa 3

Adicionalmente se reportan las variables de control promedio en las templeas evaluadas.

Tabla 10 Variables de control, templeas evaluadas

| | Templa 1 | Templa 2 | Templa 3 |
|---------------------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| Temperatura promedio del tacho | 61,1 °C Cv: 6,13% | 65,6 °C Cv: 5,50% | 65,5 °C Cv: 4,24% |
| Presión de Vacío | 17,7 inHg Cv: 1,85% | 21,6 inHg Cv: 2,79% | 21,1 inHg Cv: 2,58% |
| Presión de Vapor | 5,08 psi Cv: 48,4% | 4,12 psi Cv: 69,3% | 7,78 psi Cv: 39,5 |
| RPM | 59,4 Cv: 11,8% | 57,0 Cv: 9,15% | 56,0 Cv: 10,1% |

VIII. DISCUSIÓN

En primera instancia es importante mencionar que los indicadores evaluados no se calculan de manera inmediata con el valor del coeficiente de sobresaturación por lo que no se evidencia una asociación directa a partir de su modelo de cálculo, sin embargo, guardan relación al utilizar factores similares como son la pureza y grados Brix de las diferentes corrientes de proceso en la etapa de cocimiento.

A partir de la experimentación realizada, es relevante destacar que, debido a la variabilidad de condiciones en un proceso de producción industrial, no todas las plantas cuentan con el mismo número de muestras. Esta diferencia en la cantidad de datos puede influir en la comparación de resultados entre las plantas y afectar el análisis. Entre tanto, debido a la distribución de actividades durante la evaluación y el tiempo que estas toman, no ha sido posible recolectar una mayor cantidad de muestras que permita determinar una tendencia más clara de los diferentes indicadores y variables. Además, es importante recordar que las plantas 2 y 3 presentaban una diferencia operativa adicional: el uso del equipo de control SeedMaster, que basa sus lazos de control en el coeficiente de sobresaturación.

A partir de la medición del flujo de agua, se obtuvo un valor promedio del ingreso de agua adicional en cada planta, por lo que no se tiene una medición punto a punto, como ocurre con el coeficiente de sobresaturación. Por esta razón, se decide comparar los valores promedios en lugar de analizar cada punto individualmente. Es importante aclarar que el ingreso de agua adicional durante la planta depende en gran medida del operario de la estación (tachero), quien añade agua en base a su criterio o resultados del laboratorio de cristalografía, cuando es necesario borrar el cristal debido a la presencia de falso grano, cristal conglomerado o una alta variación en el tamaño de este. Esta adición de agua genera un aumento en el consumo de vapor, ya que es necesario evaporar el agua extra. Los resultados presentados en la tabla 5 muestran que, en promedio, las tres plantas mantienen el coeficiente de sobresaturación dentro del rango óptimo de operación (1.0-1.2). Sin embargo, de acuerdo con la tabla 7, se observó un consumo de agua adicional similar en las plantas 1 y 2. Es relevante destacar que en la planta 2 hubo un inconveniente con la conexión del equipo de medición de flujo Panametrics, lo que provocó que no se tuviera registro de flujo en parte del proceso. Al analizar los resultados del coeficiente de sobresaturación y el consumo de agua, se puede inferir que cuando el coeficiente se aproxima al límite inferior del rango óptimo, el cristal

podría no crecer de manera adecuada, lo que lleva al tachero a añadir agua. Asimismo, cuando el coeficiente de sobresaturación presenta una baja variación, como en la templa 3, el ingreso de agua adicional no es necesario, lo que se traduce en un menor consumo de vapor. En contraste, la templa comparativa operacionalmente, la número 2, mostró una mayor variación en el coeficiente de sobresaturación y registró un ingreso de agua considerable. Esto sugiere que mantener una baja variación cuando el coeficiente de sobresaturación se encuentra en el rango óptimo de operación se obtiene un beneficio por la reducción del consumo de vapor adicional.

Tanto el agotamiento como el contenido de cristal en la masa cocida son indicadores clave de la eficiencia del cocimiento, ya que reflejan el grado de cristalización alcanzado: a mayor valor, mejor eficiencia. De manera general, el agotamiento tiende a aumentar conforme incrementa la pureza de la masa cocida. Aunque el coeficiente de sobresaturación no afecta directamente la pureza de la masa, su cálculo depende de estos valores, los cuales tienden a aumentar a lo largo de la templa debido a la concentración del material, que ocurre por la evaporación de agua. Sin embargo, en materiales de alta pureza, como los utilizados en una refinería, esta tendencia creciente no es tan evidente, ya que los valores de pureza suelen mantenerse más constantes durante el cocimiento. Por esta razón, los valores de agotamiento y contenido de cristal se reportan en la masa descargada y suelen ser similares. Un coeficiente de sobresaturación de una muestra puntual elevado podría indicar una mayor pureza en la muestra. Al contrastar las templas 2 y 3, que son operativamente comparables, se observa que cuando la masa descargada presenta un coeficiente de sobresaturación bajo, el agotamiento también es menor y viceversa, como se muestra en las tablas 5 y 7. Esto sugiere que templas con un coeficiente de sobresaturación bajo pueden ser indicio de un menor agotamiento y contenido de cristal final. Estos indicadores son de gran importancia para la siguiente etapa del proceso, la estación de centrifugas, ya que un agotamiento elevado reduce la cantidad de masa cocida a procesar, lo que aumenta la proporción de cristales, minimizando el consumo de vapor y la capacidad requerida en las centrifugas.

De manera ideal, podría creerse que un mayor coeficiente de sobresaturación permite llevar a cabo el cocimiento en un menor tiempo, ya que podría favorecer una mejor cristalización. No obstante, en el entorno industrial, existen diversos factores que pueden retrasar este proceso, tales como las condiciones del vapor, las características fisicoquímicas del material inicial de la templa, y el estado de limpieza de los equipos. Al analizar los resultados promedio del coeficiente de sobresaturación y los tiempos de cocimiento reportados en la tabla 8, no se observa una tendencia clara que indique

que un mayor coeficiente de sobresaturación reduzca el tiempo de cocimiento, o viceversa. Sin embargo, se puede concluir que mantener un coeficiente de sobresaturación dentro del rango óptimo de operación asegura que el tiempo de templa también se mantenga dentro del rango teórico esperado, lo que sugiere que un control adecuado del coeficiente contribuye a mantener la estabilidad en los tiempos de cocimiento, aunque otros factores externos continúen influyendo en el proceso.

Es importante aclarar que la velocidad de cristalización en este estudio se relaciona con el crecimiento del cristal a lo largo de la templa y el porcentaje de cristal final, que describe la proporción de cristales en relación con el total del material en la muestra. En esta etapa del análisis, el tamaño promedio del cristal no se controla, ya que el tamaño final del cristal es determinado por el ingenio en función del tipo de granulometría deseada para el azúcar. Según las figuras 1-3, se observa que mantener un coeficiente de sobresaturación relativamente estable, sin grandes variaciones a lo largo de la templa, permite un crecimiento del cristal de manera creciente y con un coeficiente de variación aceptable, que para cocimientos de alta pureza debería estar alrededor del 30-40%[1]. Además, es deseable obtener un alto porcentaje de cristal, lo cual se logra con un coeficiente de sobresaturación dentro del rango óptimo, y este comportamiento está relacionado con el agotamiento y el porcentaje de cristal mencionado anteriormente. No obstante, en la templa 3 se presentan valores negativos del porcentaje de cristal, lo cual podría deberse a la pequeña diferencia y alto Brix entre la masa y la miel, lo que puede causar indeterminación al aplicar la ecuación 14. Sin embargo, al eliminar estos datos atípicos, la tendencia general para esta templa se mantiene consistente.

IX. CONCLUSIONES

- Los resultados del análisis muestran que el coeficiente de sobresaturación, aunque no se asocia directamente con la eficiencia del cocimiento en términos de tiempo, tiene un impacto significativo en los indicadores de eficiencia como el agotamiento y el contenido de cristal. Un coeficiente de sobresaturación dentro del rango óptimo se correlaciona con un crecimiento de cristal más consistente y un mayor porcentaje de cristal final, lo que sugiere una eficiencia mejorada en el proceso. Sin embargo, la variabilidad en los resultados entre las templas destaca la importancia de controlar otros factores operativos además del coeficiente de sobresaturación para optimizar la eficiencia del cocimiento.
- La variabilidad en las condiciones de operación, como el estado de los equipos y las características del material inicial, así como los problemas de medición como los encontrados en la templa 2, afectan significativamente los resultados del análisis. Esta variabilidad puede dificultar la identificación de tendencias claras entre el coeficiente de sobresaturación y otros indicadores, como el tiempo de cocimiento y el consumo de agua adicional.
- Aunque se podría esperar que un mayor coeficiente de sobresaturación reduzca el tiempo de cocimiento debido a una cristalización más rápida, los resultados no muestran una tendencia clara en esta dirección. La estabilidad del coeficiente de sobresaturación dentro del rango óptimo contribuye a mantener el tiempo de cocimiento en el rango teórico esperado, pero otros factores como las condiciones del vapor y el estado de los equipos tienen un impacto considerable en la duración del cocimiento. Además, un coeficiente de sobresaturación con baja variación está asociado con un menor consumo de vapor lo que puede mejorar la eficiencia operativa y reducir el consumo de recursos.
- El agotamiento y el contenido de cristal final son indicadores cruciales para la etapa siguiente del proceso, la estación de centrifugas. Un alto agotamiento implica una mayor proporción de cristales en la masa cocida, lo que puede reducir la cantidad de masa a procesar y, por ende, el consumo de vapor y la capacidad requerida en las centrifugas. Los resultados sugieren que un coeficiente de sobresaturación óptimo, que mantenga la cristalización en niveles adecuados, puede mejorar la eficiencia en la etapa de centrifugas al reducir el consumo de recursos y optimizar el rendimiento del equipo.

X. RECOMENDACIONES

- Lograr un mejor control sobre la medición del flujo de agua adicional que ingresa durante la templa, para obtener la mayor información posible sobre el consumo de vapor; es necesario realizar la validación del consumo de vapor considerando el agua evaporada por lo que se recomienda que al realizar este tipo de evaluaciones se tenga en cuenta la cantidad de cada muestra.

REFERENCIAS

- [1] Rein, Peter, *Ingeniería de la caña de azúcar*. 2012.
- [2] «Procesos», Incauca. Accedido: 31 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.incauca.com/es/procesos/>
- [3] P. Quintana-Hernandez, B. Uribe-MARTINEZ, V. Rico-Ramirez, y E. Bolaños-Reynoso, «Análisis comparativo de ecuaciones cinéticas tipo ley de potencia y difusión-integración en la cristalización por enfriamiento de azúcar de caña.», 2008, vol. 7, n.º 2, pp. 171-182, 2008.
- [4] «Cristalización del azúcar de caña | Vaisala». Accedido: 1 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.vaisala.com/es/industries-applications/cane-and-beet-sugar-milling-and-refining/cane-sugar-crystallization>
- [5] SYDLE, «KPIs: ¿Qué son, cuál es su importancia y cómo utilizarlos? Ve ejemplos», Blog SYDLE. Accedido: 7 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.sydle.com/es/blog/kpi-615de90225ce5d3ef29a5570>
- [6] J. G. Rodríguez y M. F. Hernandez, «Evaluación del Sistema de Predicción de Sobresaturación en Tachos de Refinería del Ingenio Riopaila Castilla.» CENICAÑA, agosto de 2024.
- [7] D. J. Love, «Dynamic modelling and optimal control of sugar crystallisation in a multi-compartment continuous vacuum pan.», 2002, Accedido: 14 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10413/610>