

**Universidad de Matanzas
Facultad de Ciencias Técnicas
Departamento de Química**



**Evaluación de la incidencia del contenido de
almidón en el proceso de producción de azúcar
crudo**

Trabajo de Diploma en opción al título de Ingeniero Químico

Autor: Marisleidy Alfonso Rodríguez

Tutores: MsC. Saul Dueñas Casas

DrC. Héctor Luis Ramírez

DrC. Jesús Luis Orozco.

Matanzas, 2022

PENSAMIENTO

‘Nosotros vivimos en un universo. Entre otras cosas esto significa que la ciencia, la ingeniería, la búsqueda de la justicia, la búsqueda de la belleza y la búsqueda de la santidad están interrelacionadas’

W.K. Lewis, profesor del M.I.T.

DECLARACIÓN DE AUTORIDAD

Yo, Marisleidy Alfonso Rodríguez declaro que soy la única autora de este trabajo de diploma y, en calidad de tal, autorizo a la Universidad de Matanzas «Camilo Cienfuegos» a darle el uso que estime más conveniente.

DEDICATORIA

A mis padres por su amor y apoyo incondicional.

A mi hermana por ser mi cómplice.

A mi familia por guiarme y creer en mí siempre.

A mi tutor Saul por su paciencia y ayuda.

A todos gracias por estar conmigo en el cumplimiento de este sueño

AGRADECIMIENTOS

- ✓ *A mis padres Mayrene e Inaury por haberme educado y convertido en la persona que soy. Por darme su apoyo incondicional y motivarme en el cumplimiento de mis sueños y metas. Por enseñarme a enfrentar los problemas y ser fuerte ante ellos.*
- ✓ *A mi hermana Leidy Marian que entre peleas y pruebas de la vida cada día nos unimos más. Gracias por tu apoyo y tus consejos.*
- ✓ *A toda mi familia: a los que me animaron y creyeron en mí aun cuando casi ni yo creía y a los que siempre dudaron, hoy cumplo este logro que es de ustedes también.*
- ✓ *A mis amigos de siempre y los conocidos durante esta etapa de mi vida por estar cuando los necesito y por darme su apoyo. He aprendido mucho de cada uno de ustedes y lo seguiré haciendo porque cada día aprendemos algo nuevo.*
- ✓ *A mis niñas del 143: Kiara, Annia, Mariangela, Nainelys y Krislayne. Mi gran familia universitaria que entre risas, llantos, celebraciones, malas noches de estudio y temas de conversación ante un examen, peleas y discusiones hemos creado lazos indestructibles. En especial a mi Kiara, mi hermana de otro ADN sin ti no hubiera llegado al final de esta etapa. Gracias por hacerme parte de tu*

familia la cual adoro, por aguantar cada uno de mis cambios de humor, por siempre estar presente.

- ✓ A Comita y Monterrey por contribuir a mi llegada diaria y a tiempo a la Universidad por ayudarme cada vez que los necesito.*
- ✓ A mi tutor Saul por su paciencia, dedicación, ayuda y conocimientos brindados no solo en la tesis sino cada vez q le necesite.*
- ✓ A todos mis profesores que contribuyeron a mi preparación y formación profesional, por su ardua labor y entrega día a día durante estos años*

Gracias a todos

Resumen

La presente investigación se encuentra dirigida a demostrar la incidencia del contenido de almidón y otros parámetros operacionales y de calidad de la industria. Para ello se realiza la recopilación de datos del proceso de producción de azúcar crudo del central Jesús Sablón Moreno durante un periodo de 6 días durante la zafra 2021-2022, y se realiza un procesamiento estadístico preliminar de los mismos. Se realiza un análisis tanto cuantitativo como cualitativo de la información mediante el método de Análisis de Modalidades de Fallas y sus Efectos (FMEA). Por otra parte, se estudia el efecto de la velocidad de sedimentación en diversos indicadores de calidad de la industria. Los parámetros de mayor prioridad de riesgo que afectan el proceso son el contenido de almidón en el jugo mezclado, las pérdidas de sacarosa en miel y bagazo. El incremento de la viscosidad en los jugos por la presencia de almidón, causa una reducción en la velocidad de sedimentación de las impurezas.

Abstract

The present investigation is aimed at demonstrating the incidence of starch content and other operational and quality parameters of the industry. For this, the data collection of the raw sugar production process of the Jesús Sablón Moreno mill is carried out during a period of 6 days during the 2021-2022 harvest, and a preliminary statistical processing of the same is carried out. Both a quantitative and a qualitative analysis of the information is carried out using the Failure Modes and Effects Analysis (FMEA) method. On the other hand, the effect of sedimentation speed on various quality indicators of the industry is studied. The highest priority risk parameters affecting the process are starch content in the blended juice, sucrose losses in honey and bagasse. The increase of viscosity in the juices due to the presence of starch causes a reduction in in the sedimentation rate of impurities.

Índice

Introducción	1
Capítulo I. Análisis Bibliográfico	4
1.1. Técnicas de análisis de riesgo en procesos industriales.....	4
1.1.1. Métodos Comparativos.....	6
1.1.2. Métodos Generalizados.....	7
1.2. Riesgos presentes en la industria azucarera	13
1.2.1. Tipo y descripción de factores de riesgo.....	14
1.2.2. Riesgos más frecuentes en la industria azucarera	19
1.3. Riesgos producidos por alteración en la composición de las corrientes. Repercusión y causas que lo originan	21
1.3.1. Influencia de la presión en la composición del jugo en el proceso de extracción en los molinos	21
1.3.2. Influencia de la temperatura en el proceso de purificación.....	22
1.3.3. Influencia de la presión y la temperatura en el múltiple efecto	23
1.4. Conclusiones Parciales	23
Capítulo II. Materiales y Métodos	25
2.1. Descripción del proceso objeto de estudio.....	25
2.1.1. Etapa de preparación y molienda	25
2.1.2. Etapa de purificación	26
2.1.3. Etapa de evaporación.....	27
2.1.4. Etapa de cristalización y centrifugación.....	27
2.2. Descripción del caso de estudio	28
2.2. Caracterización de indicadores de la producción.....	28
2.3. Aplicación de la técnica de análisis de riesgos FMEA	29
2.4. Etapa Experimental.....	31

Capítulo III. Análisis de los resultados	32
3.2. Análisis de la repercusión del FMEA.....	38
Conclusiones	42
Recomendaciones.....	43
Referencias Bibliográficas	44
Anexos.....	49

Introducción

El desarrollo de la industria química está enfocado en ofrecer productos de calidad a la sociedad generando mayores ingresos económicos con el menor consumo posible de materias primas y mínimo daño al medio ambiente y al hombre (García, 2021).

La producción de azúcar crudo se considera uno de los procesos más importantes en el área de la industria alimentaria y el comercio, por los innumerables aportes que realiza a la economía del país (Dueñas, 2020).

Cuba constituyó por mucho tiempo uno de los más grandes productores de azúcar en el orbe; no obstante, depresiones económicas y decisiones no acertadas provocaron la paralización y retroceso de esta actividad.

Por tal motivo toda investigación dirigida a aumentar la calidad y eficiencia del proceso de producción de azúcar crudo, beneficia el desarrollo de la sociedad y el país en general (Dueñas, 2020).

La calidad del proceso de producción y del producto final se afecta por diferentes parámetros: incorrecta operación en las diferentes áreas por parte de los equipos y los operarios e innumerables afectaciones que puede traer consigo la violación en la normalización de los recursos a emplear. Uno de los factores que más afecta es el contenido de polisacáridos que se incorpora al proceso por medio de la caña de azúcar que es la principal materia prima (Dueñas, 2020; García, 2021)

La presencia de algunos polisacáridos indeseables en los jugos de la caña como el almidón puede ocasionar consecuencias irreversibles en la producción de azúcar crudo y provocar pérdidas (San Martín, 2020).

El almidón es un polímero de glucosa que se encuentra en el protoplasma de las hojas de la caña y en el extremo del tallo de la misma. Se plantea que los mayores depósitos de este polisacárido se localizan habitualmente cerca de los nudos a partir del cual se propaga la caña. Constituye una impureza del jugo de caña de azúcar y trae efectos adversos en los procesos de producción y refinación del

azúcar crudo. Como consecuencia se afecta la cantidad y calidad del azúcar producido (Eggleston *et al.*, 2006).

El almidón reduce la calidad del jugo y azúcar crudo al demorar o inhibir la cristalización aumenta las pérdidas de azúcar en la miel final; son muy difíciles de remover en el proceso y tienden a ocluirse en el cristal de azúcar debido a su naturaleza de carbohidratos y su gran solubilidad; reduce la filtración y la afinación del azúcar crudo, y constituye un impedimento para el proceso de decoloración en la refinación (San Martín, 2020).

El contenido de almidón es un parámetro importante a considerar durante el proceso de elaboración de azúcar crudo, en la industria, es común cuantificar su contenido para disminuir sus efectos negativos en la capacidad productiva, por lo que es necesario contar con técnicas, herramientas y correlaciones que nos permita determinar dicho efecto en la calidad del proceso, la seguridad y los equipos (Dueñas, 2020).

Teniendo en cuenta esta problemática se ofrece como **Problema Científico** el siguiente:

¿Cómo evaluar la incidencia del contenido de polisacáridos en el proceso de producción de azúcar crudo del “EAA Jesús Sablón Moreno”??

Como solución a dicho problema se plantea la siguiente **hipótesis** de trabajo:

Si se realiza un análisis cualitativo y cuantitativo de la incidencia de diversos parámetros operacionales y de calidad en la industria, se podrá detectar el efecto del contenido de almidón en la misma, y proponer medidas correctivas en caso de afectaciones en su calidad y eficiencia.

Objetivo general

Evaluar la incidencia del contenido de almidón en el proceso de producción de azúcar crudo del “EAA Jesús Sablón Moreno”.

Objetivos específicos

- ✓ Determinar la incidencia del contenido de almidón en el proceso de producción de azúcar crudo.
- ✓ Identificar las acciones que podrán eliminar o reducir los efectos negativos en el proceso.
- ✓ Estudiar el efecto de la velocidad de sedimentación en indicadores de calidad de la industria.

Capítulo I. Análisis Bibliográfico

En este capítulo se profundiza en las siguientes temáticas: técnicas de análisis de riesgo en procesos industriales; riesgos presentes en la industria azucarera, así como, los riesgos producidos por alteración en la composición de las corrientes, repercusión y causas que lo originan. La investigación se realiza mediante búsqueda bibliográfica en bibliotecas científico técnicas y en las diferentes bases de datos disponibles en internet, a través del uso de buscadores existentes, como: Google, AltaVista, Scirus, entre otros. Además, se emplean bases de datos remotas (EBSCO, ScienceDirect, entre otros) y bibliotecas.

1.1. Técnicas de análisis de riesgo en procesos industriales

PNUMA/IPCS (1999) indica que el proceso de la evaluación de riesgos es un intento científico de identificar y estimar los riesgos reales, el peligro, la relación de dosis-respuesta (efecto) y la caracterización del riesgo. Se puede definir como la identificación y cuantificación del riesgo resultante del uso o presencia de un agente químico o físico; toma en cuenta tanto los posibles efectos dañinos en las personas o las sociedades que usan dicho agente en la cantidad y de la manera recomendada como las vías posibles de exposición. La cuantificación requiere, idealmente, el establecimiento de las relaciones dosis-efecto y dosis-respuesta en los individuos y poblaciones objetivo (Rodríguez et al., 2015).

Según Casal (2001), la evaluación de los diversos riesgos potenciales existentes en una determinada instalación industrial se lleva a cabo modernamente mediante la aplicación de un conjunto de metodologías específicas, que consisten básicamente en la determinación de los siguientes aspectos: accidentes que pueden ocurrir, frecuencia de los mismos y magnitud de sus consecuencias (Cedeño, 2014).

Para evaluar el riesgo se estudian esencialmente los acontecimientos internos aquellos que tienen su origen en la propia industria. Simultáneamente se estudian también los acontecimientos externos, tanto los de origen natural (terremotos, inundaciones) como artificial (explosiones, incendios o nubes

procedentes de plantas vecinas, accidentes de carretera) capaces de originar posteriores emergencias internas.

Algunas de las técnicas utilizadas son claramente determinísticas (ej., el cálculo de consecuencias con modelos matemáticos), otras son netamente probabilísticas (ej. los árboles de fallos y los árboles de sucesos), y un tercer grupo resulta algo más difícil de clasificar; en él incluimos el análisis histórico, determinados modelos de vulnerabilidad, los índices de riesgo e incluso el HAZOP.

Casal (2001) y Hernández (2020), refleja que entre las técnicas identificativas los métodos de análisis de riesgo más utilizados:

✓ Métodos cualitativos

Auditoría de seguridad (*Safety review*) análisis histórico de accidentes, análisis preliminar de peligros (*Preliminar Hazard Analisis*, PHA), listados de control, análisis de peligro y operabilidad (*Hazard and Operability Analisis*, HAZOP) y análisis de modos de fallo y efectos (*Failure Mod and Effect analisis*, FMEA).

✓ Métodos semicuantitativos

Índice Dow, Índice Morid, índice SHI y MHI (*Substance Hazard Index and Material Hazard Index*), árboles de fallos (*Fault Tree*, FT) y árboles de sucesos (*Event Tm*, ET) (Cedeño, 2014).

Estas técnicas se aplican en distintas etapas de la vida de los procesos industriales: diseño, construcción, puesta en marcha y funcionamiento de una operación normal, modificaciones del proceso y desmantelamiento o abandono de las instalaciones.

Autores como Castro y Arcos (1998) y SPC (2002), plantean que para la realización de un exhaustivo análisis de riesgos existen diferentes técnicas o métodos de apoyo, que se dividen en dos grandes grupos: comparativos y generalizados (Cedeño, 2014).

1.1.1. Métodos Comparativos

Según Orozco (2009) se basan en la experiencia previa acumulada en un sector industrial determinado. Son muy utilizados en el análisis preliminar de riesgo. Sobre esta base se encuentran los llamados: Listas de Comprobación, Análisis Histórico de Accidentes y Análisis Preliminar de Peligros (APR).

✓ Análisis mediante *Check lists* o Lista de Comprobación

La lista de comprobación es una herramienta cualitativa “que consiste en realizar una serie de preguntas al producto a diseñar desde una perspectiva ambiental a lo largo de todo el proceso de diseño. Todas estas cuestiones han de obtener respuesta para detectar cuáles son las fases del ciclo de vida del producto en las que se debería incidir. Al tratarse de una herramienta subjetiva y cualitativa se puede aplicar de manera sencilla, rápida, sin experiencia, a modo individual o a través de talleres con todo el equipo de proyecto involucrado y de esta manera establecer las fortalezas y debilidades, así como las posibles opciones de mejora ambiental.” (Hernández, 2020).

Es un método que constituye una buena base de partida para complementarlo con otros métodos de identificación que tienen un alcance superior al cubierto por los reglamentos e instrucciones técnicas. Sin embargo, examina la instalación solamente desde el punto de vista del cumplimiento de un reglamento o procedimiento determinado (SPC, 2002).

✓ Análisis Histórico de Accidentes

El análisis histórico de accidentes es una técnica identificativa orientada a la búsqueda de información de accidentes industriales ocurridos en el pasado. Esta técnica de análisis es esencialmente cualitativa pero también permite extraer resultados numéricos o cuantitativos si el número de accidentes es suficientemente significativo y permite un análisis estadístico (Casal,1991; Hernández, 2017). La recogida sistemática de información relativa a diferentes accidentes ocurridos en el pasado en plantas químicas y actividades afines ha permitido, en algunos casos, la acumulación de datos concretos sobre una

determinada situación, equipo u operación: carga o descarga de cisternas, transporte de mercancías peligrosas, procesos de fabricación de un producto determinado, parques de almacenamiento, vertido de líquidos inflamables, escape de un gas tóxico, etc.

El método de análisis empleado no está excesivamente estructurado. El acceso a las bases de datos suele realizarse mediante palabras clave. La concurrencia de diferentes palabras clave permite acotar la información y llegar a la identificación de los accidentes que pueden ser interesantes para el estudio. Después de una evaluación de la información, ésta se ordena y, si los datos lo permiten, se procesa estadísticamente para obtener resultados numéricos que faciliten su interpretación (Boza, 2019).

1.1.2. Métodos Generalizados

Según D.G.P.C. (1997a); D.G.P.C. (1997b) y D.G.P.C. (1997c) son aquellos que requieren de mayor información acerca del proceso a analizar y constituyen poderosas herramientas para la identificación de peligros y análisis de los riesgos asociados. Generalmente se utilizan en una etapa posterior al análisis de riesgo, cuando se han seleccionado aquellos que ameritan una evaluación con mayores niveles de detalle. Entre estos se destacan: Análisis de Peligro y Operatividad (por sus siglas en inglés HAZOP); Análisis “¿Qué sucedería si...?” (*What if?*); Análisis de modalidades de falla y sus efectos (FMEA); Análisis de árbol de fallas (FTA) y Análisis de árbol de eventos (ETA).

✓ Análisis de Peligro y Operatividad (por sus siglas en inglés HAZOP)

El análisis de peligros y operabilidad (*Hazard and Operability Analysis*, HAZOP), es un método que fue diseñado en Inglaterra en la década de los sesenta por *Imperial Chemical Industries* (ICI) para aplicarlo al diseño de plantas de fabricación de pesticidas (Casal, 2001).

Nolan (2011), plantea que HAZOP es una técnica de revisión cualitativa de investigación sistemática. Knowlton (1981), Ramos (1987) y Vílchez (2001), señalan que es la metodología de análisis de riesgos más usada. Y que este

método se fundamenta en el hecho de que la probabilidad de que aparezcan problemas aumenta cuando las condiciones y variables de operación se alejan de sus valores normales. En él se utilizan una serie de palabras guías (no, más, menos, otro, etc.) destinadas a facilitar la búsqueda de posibles desviaciones al ser aplicadas sistemáticamente a los diferentes componentes de la instalación estudiada. Esta es una tarea que hay que realizar en equipo, muy metódica y según un procedimiento formalizado, generándose una notable cantidad de información sobre las condiciones de deriva de la instalación y los sistemas de control que permiten corregir esta situación.

El paso previo para el desarrollo del análisis es la definición del objetivo y el alcance del estudio, de los límites físicos de la instalación o el proceso que se quiera estudiar y de la información requerida. Además, debe estudiarse el sistema o proceso ya definido para conocer la información disponible, prepararla, organizar el equipo de estudio, planear la secuencia de estudio y las sesiones de trabajo (Casal, 2001; Servicio de Protección Civil de Barcelona, 2002).

El método de análisis HAZOP presupone tres hipótesis que constituyen sus principales limitaciones (Casal, 2001; Servicio de Protección Civil de Barcelona, 2002): la instalación está bien diseñada, en relación con la experiencia, el conocimiento de los procesos implicados y la aplicación de las normas y códigos pertinentes; los materiales de construcción han sido los adecuados y la construcción y el ensamblaje se han hecho correctamente; y los análisis son una “fotografía instantánea” donde se mezclan sucesos de efecto inmediato con sucesos de elevada inercia temporal.

El resultado principal de los análisis HAZOP es un conjunto de situaciones peligrosas y problemas operativos y una serie de medidas orientadas a la reducción del riesgo existente o a la mitigación de las consecuencias de los problemas operativos. El análisis HAZOP es un instrumento de estudio muy indicado para procesos en fase de diseño y construcción, donde la documentación está totalmente actualizada y las recomendaciones del análisis no suponen modificaciones costosas ni paros en la planta. Por otro lado, a causa

de la laboriosidad del método y del grado de detalle que el estudio proporciona, el análisis HAZOP solo es indicado para instalaciones específicas y no como método general de análisis (Casal, 2001).

✓ ¿Qué pasa si...? o *What if?*

El objetivo fundamental de este método es la detección y análisis de las desviaciones sobre los procesos y condiciones previstas intentando evitar aquellos eventos que pueden resultar no deseables (Cedeño, 2014). Es un método de revisión de seguridad mediante las preguntas de investigación ¿Qué pasa sí? que se preguntan por un equipo experimentado y conocedor del sistema bajo revisión (Nolan, 2011).

Básicamente consiste en responder cualitativamente a una batería de preguntas del tipo ¿Qué pasa sí? En relación con la cantidad o la concentración de las materias primas o en relación con las variables del proceso o los servicios necesarios. Para llevar a cabo este análisis de forma estructurada se recomienda seguir la línea de proceso desde la recepción de los materiales hasta la entrega del producto terminado (Poujaud, 2017) . En la primera fase se les pide a los participantes que planteen cualquier pregunta del tipo ¿Qué pasa sí? en relación con cada unidad o etapa del proceso. Una vez recopiladas todas estas situaciones se intentará dar respuesta a cada una de ellas con la participación de especialistas si fuera necesario. Una vez identificados los peligros y sus posibles consecuencias deben proponerse las medidas disponibles para minimizarlos

Resulta un sistema muy creativo y de simple aplicación (y por tanto muy económico). Sin embargo, aun realizándose de modo estructurado, puede pasar por alto algunos peligros menos evidentes, pero no por ello menos graves (Carol, 2001).

- ✓ Análisis de modalidades de falla y sus efectos (por sus siglas en inglés FMEA)

Según Muñoz (1992), es una técnica muy utilizada en los sistemas de calidad para identificar causas de fallos. Se inicia el estudio identificando todos los equipos de la planta y estableciendo sus condiciones normales de proceso. A continuación, para cada equipo, se detallan todos y cada uno de los fallos posibles y se analizan sus posibles consecuencias. Si se da la circunstancia de que una situación de fallo en un equipo produce una alteración en otro, debe trasladarse esta influencia al estudio del equipo afectado. Una vez conocidas las consecuencias, se deben proponer las acciones de mejora necesarias para eliminar o reducir el peligro. En general, para cada elemento se complementa una tabla con las siguientes columnas: elemento, descripción del equipo, modo de fallo, forma de detección del fallo, efectos del fallo y medidas correctoras.

- ✓ Árboles de fallo

La elaboración de Árboles de Fallos (*Fault Tree (FT)*) es una técnica de análisis creada por *Bell Telephone Laboratories* al inicio de la década de los sesenta, para mejorar la fiabilidad del sistema de control del lanzamiento de cohetes. Posteriormente, su utilización se extendió a otros campos de la industria y en especial, fue muy empleada en la industria nuclear (Casal, 2001).

El análisis mediante Árboles de Fallos según señala Carol (2001), es una técnica cuantitativa que permite estimar la probabilidad de ocurrencia de un fallo determinado a partir del conocimiento de la frecuencia de ocurrencia de los sucesos iniciadores y causales mediante la utilización de procesos lógicos inductivos y la confección de una secuencia lógica de sucesos, denominada, Árbol de Fallos. Nolan (2011), añade que el Árbol de Fallos es una técnica que se enfoca en un incidente en particular, a menudo llamado evento inicial, y entonces se construye un diagrama de sucesiones lógicas de todas las secuencias de eventos concebibles que pudiera llevar a ese incidente.

Los fallos que se dan en sistemas técnicos pueden ser básicamente de dos tipos (Casal, 2001): fallos primarios, aquellos atribuibles a defectos de los componentes y no a la interacción con el exterior (por ejemplo, una soldadura mal hecha, etc.); y fallos secundarios, aquellos atribuibles a la interacción del exterior con los componentes, como resultado de condiciones anómalas de funcionamiento con una causa bien definida.

El primer paso para la elaboración de un Árbol de Fallos es un estudio previo del sistema o proceso que se quiere analizar con el fin de determinar los incidentes susceptibles de ser analizados. Este estudio suele realizarse con otras técnicas de identificación, como el análisis histórico de accidentes, análisis HAZOP, etc (Casal, 2001; Nolan, 2011). Una vez determinados los accidentes que se quieren analizar, deben establecerse los límites de la instalación. Seguidamente, es necesario identificar los fallos de los elementos y las relaciones lógicas que conducen al accidente. El proceso finaliza cuando todos los fallos identificados son primarios y no es posible determinar sus causas (Casal, 2001).

Existen dos maneras de analizar los Árboles de Fallos, de forma cualitativa y de forma cuantitativa. El análisis cualitativo posibilita conocer los conjuntos mínimos de corte. Donde cada uno de los conjuntos mínimos representa una manera distinta de llegar al suceso no deseado. Los métodos cualitativos de análisis de Árboles de Fallos son básicamente los métodos analíticos, el cálculo matricial y los métodos numéricos. Mientras que el análisis cuantitativo permite calcular básicamente la frecuencia de acontecimiento de un accidente y la indisponibilidad del sistema (Casal, 2001).

La limitación principal de la metodología es que únicamente se pueden representar fallos “totales”, es decir, siempre se considera el fallo completo del elemento involucrado en la cadena de sucesos que conduce al accidente y representan fotografías instantáneas del proceso (Casal, 2001). La ventaja principal de esta técnica es su representación gráfica pues es un modelo gráfico en forma de árbol invertido que ilustra la combinación lógica de fallos parciales que conducen al fallo del sistema (CCPS, 1992).

✓ Método del Árbol de Sucesos.

El Árbol de Sucesos o análisis de secuencias de sucesos es un método inductivo que describe la evolución de un suceso iniciador sobre la base de la respuesta de distintos sistemas tecnológicos o condiciones externas. Partiendo del suceso iniciador y teniendo en cuenta los factores condicionantes involucrados, el árbol describe las secuencias accidentales que conducen a distintos eventos (Dirección General de Protección Civil, 1994; Servicio de Protección Civil, 2002).

Wells (2003), señala que los Árboles de Sucesos son la mejor herramienta para el análisis de consecuencias. Estos son usados para realizar un análisis probabilístico. El cual se organiza mediante una estructura de árbol en la que cada bifurcación se decide a partir de la ocurrencia de un fenómeno u otro.

La construcción del árbol comienza por la identificación de los N factores condicionantes de la evolución del suceso iniciador. A continuación, se colocan estos como cabezales de la estructura gráfica. Partiendo del iniciador se plantean sistemáticamente dos bifurcaciones: en la parte superior se refleja el éxito o la ocurrencia del suceso condicionante y en la parte inferior se representa el fallo o no ocurrencia del mismo (Dirección General de Protección Civil, 1994; Servicio de Protección Civil, 2002).

De esta forma, se obtienen 2^N combinaciones o secuencias teóricas. Sin embargo, las dependencias entre los sucesos hacen que la ocurrencia o éxito de uno de ellos pueda eliminar la posibilidad de otros, reduciéndose así el número total de secuencias. La disposición horizontal de los cabezales se suele hacer por orden cronológico de evolución del accidente (Dirección General de Protección Civil, 1994; Servicio de Protección Civil, 2002).

Carol (2001), plantea que una vez realizado el análisis se obtiene una representación gráfica en forma de árbol horizontal en la que quedan representadas todas las posibles evoluciones del sistema según se den o no las diferentes alternativas planteadas hasta los sucesos accidentales finales (BLEVE, nube de gas, explosión, dispersión, etc.).

Wells (2003), establece los siguientes pasos para el análisis de Árboles de Sucesos:

1. Identificar el evento iniciador que generalmente es un evento de fallo correspondiente al escape de un material peligroso.
2. Identificar el desarrollo del incidente.
3. Construir el árbol de evento. Este es construido de izquierda a derecha, en cada nodo se muestran las alternativas analizadas.
4. Clasificar los resultados del incidente.
5. Estimar la posibilidad de ocurrencia de cada suceso.
6. Clasificar los resultados y determinar su probabilidad.

Según la Dirección General de Protección Civil (1994) y el Servicio de Protección Civil (2002), la metodología del Árbol de Sucesos posee las siguientes ventajas y desventajas.

Ventajas: Permite un estudio sistemático y exhaustivo de la evolución de un suceso. Su aplicación es muy sencilla.

Inconvenientes: El valor obtenido está sujeto a incertidumbre por la dificultad que existe normalmente en evaluar las probabilidades de los factores asociados. Si el árbol es grande, su tratamiento puede hacerse laborioso.

A partir del análisis de los métodos anteriores y la situación de la industria objeto de estudio el autor considera utilizar el método de Análisis de Modalidades de Fallas y sus Efectos (FMEA) para la realización del análisis de riesgo. Al tener en cuenta tanto el aspecto cuantitativo como cualitativo, y ser poca la complejidad a la hora de su aplicación.

1.2. Riesgos presentes en la industria azucarera

La agroindustria de la caña de azúcar constituye una cadena de valor integrada por abastecedores de caña (productores, jornaleros, cortadores, maquinaria agrícola, cosechadora, alzadoras, insumos agrícolas), ingenios (empleados,

trabajadores, maquinaria, equipo) y consumidores del azúcar de caña (industriales y finales). El azúcar que se obtiene de la caña de azúcar requiere de un largo proceso desde el cultivo de la caña hasta que se comercializa nacional e internacionalmente. Esta cadena productiva está compuesta por etapas y labores que involucran el uso de recursos (suelo, las variedades de caña de azúcar, agroquímicos, etc.), medios (herramientas, transporte, maquinaria, equipos, etc.), instalaciones y el trabajo (físico y mental). Se trata de un proceso considerado riesgoso (Falcon y Rojas, 2017).

El ingenio azucarero es un ambiente de trabajo donde hay peligros y riesgos que pueden producir efectos negativos en la salud y seguridad de los trabajadores y provocar accidentes con lesiones (Falcon y Rojas, 2017).

1.2.1. Tipo y descripción de factores de riesgo

1. Físicos

Son todos aquellos factores ambientales de naturaleza física que pueden provocar efectos adversos a la salud según sea la intensidad, exposición y concentración de los mismos. Entre los peligros físicos tenemos (Marcelo, 2016):

- ✓ Ruido: producido por plantas generadoras, eléctricas, esmeriles, pulidoras, equipos de corte, herramientas neumáticas, etc.
- ✓ Iluminación: la iluminación como tal no es un riesgo. Se presenta generalmente por deficiencia o inadecuada iluminación en las áreas de trabajo.
- ✓ Radiaciones no ionizantes: las más comunes son: rayos ultravioletas, radiación infrarroja, microondas y radio frecuencia. Principales fuentes generadoras: el sol, lámparas de vapor, de tungsteno y halógenos, superficies calientes, etc.
- ✓ Temperaturas extremas (altas o bajas): las temperaturas extremas de calor se encuentran principalmente en el trabajo con hornos, fundición, ambientes a campo abierto (dependiendo de las condiciones climáticas del lugar), etc. Las temperaturas bajas se presentan frecuentemente en trabajos de

conservación de alimentos o productos que necesitan estar en ambientes fríos. Refrigeradores, congeladores, cuartos fríos, cavas (bóveda empleada para el almacenamiento de vino en botellas o barriles), etc.

- ✓ Vibraciones: principales fuentes generadoras: prensas, herramientas neumáticas (martillos), alternadores, motores, etc.
- ✓ Humedad: contacto con el agua.

2. Químicos

Se define como toda sustancia orgánica e inorgánica, natural o sintética que durante la fabricación (manejo, transporte, almacenamiento o uso) puede incorporarse al medio ambiente. Estas sustancias pueden aparecer en forma de polvo, humo, gas o vapor, con efectos irritantes, corrosivos, asfixiantes, tóxicos y en cantidades que tengan probabilidades de lesionar la salud de las personas por contacto directo. Los factores de riesgo químico los clasificamos en (Marcelo, 2016):

- ✓ Polvos: son partículas sólidas que se liberan en granos finos, fibras que flotan en el aire por acción de la gravedad, antes de depositarse. Estas se presentan generalmente en trabajos de pulido, triturado, perforación lijado, molienda, minería, cemento, etc. Este a su vez se divide en dos grupos que son: polvo orgánico y polvo inorgánico.
- ✓ Gases: son partículas de tamaño molecular que pueden cambiar de estado físico por una combinación de presión y temperatura. Se expanden libre y fácilmente en un área. Algunos de estos son: monóxidos, dióxidos, nitrógeno, helio, oxígeno, etc.
- ✓ Aerosoles: un aerosol es una dispersión de partículas sólidas o líquidas, de tamaño inferior a 100 micras en un medio gaseoso y se clasifican en:
 - Líquidos o nieblas: son partículas formadas por materiales líquidos sometidos a un proceso de atomización o condensación. Se presentan por lo general en trabajos de atomización, mezclado, limpieza con vapor de agua, etc. Estos, a su vez, se dividen: puntos de rocío y brumas.

- Vapores: Fase gaseosa de una sustancia sólida o líquida a unas condiciones estándares establecidas. Se generan a partir de disolventes, hidrocarburos, diluyentes, etc.
- Sólidos (sólido o material particulado): Son partículas que se liberan en granos finos, que flotan en el aire por acción de la gravedad, antes de depositarse. Estas se presentan, generalmente, en trabajos de pulido, triturado, perforación lijado, molienda, minería, cemento, etc. Este, a su vez, se divide en dos grupos que son: polvo orgánico y polvo inorgánico.
- ✓ Humos: Son formados cuando los materiales sólidos se evaporan a altas temperaturas. El vapor del material se enfría y se condensa en una partícula extremadamente pequeña que flota en el ambiente. Estos humos se presentan, generalmente, en procesos de soldadura, fundición, etc. Igualmente, se dividen en dos grupos que son: humos metálicos y humos de combustión.

3. Disergonómico o biomecánico

Son aquellos generados por la inadecuada relación entre el trabajador y la máquina, herramienta o puesto de trabajo. Se refieren a todos aquellos aspectos de la organización, estación o puesto de trabajo y su diseño, que pueden alterar la relación del individuo con el objeto técnico produciendo problemas en él, en la secuencia de uso o en la producción (Marcelo, 2016).

4. Mecánicos

Presentes por aquellas condiciones peligrosas generadas por máquinas, equipos, objetos, herramientas e instalaciones que por sus condiciones de funcionamiento (diseño o por su forma, tamaño, ubicación) y disposición, al entrar en contacto directo ocasionan daños físicos como golpes, atrapamientos, amputaciones, caídas, traumatismos o daños materiales. Así mismo, se producen por herramientas, equipos o máquinas defectuosos sin la adecuada protección o sin mantenimiento, puntos de operación, mecanismos en movimiento o transmisión de fuerza, etc. Se encuentran presentes en (Marcelo, 2016): trabajo en altura, caída del mismo nivel, elementos cortantes, punzantes y

contundentes, superficies y elementos ásperos, material en movimiento, máquinas y herramientas, transporte mecánico, partes en movimiento, material proyectado y caída de objetos.

5. Eléctricos

Están constituidos por la exposición a sistemas eléctricos de las máquinas, equipos e instalaciones energizadas, alta tensión, baja tensión, energía estática, subestaciones eléctricas, plantas generadoras de energía, redes de distribución, cajas de distribución e interruptores. Al entrar en contacto con los trabajadores que no posean ningún tipo de protección, pueden provocar lesiones, quemaduras, shock, fibrilación ventricular, etc (Marcelo, 2016). Por ejemplo: contacto directo, contacto indirecto y electricidad estática.

6. Locativos

Comprende aquellos riesgos que son generados por las instalaciones locativas como las edificaciones, paredes, pisos, ventanas, ausencia o inadecuada señalización, estructuras e instalaciones, sistemas de almacenamiento, falta de orden y aseo, distribución del área de trabajo. La exposición a estos riesgos puede producir caídas, golpes, lesiones, adicionalmente daños a la propiedad, daños materiales (Marcelo, 2016). Se pueden subdividir en:

✓ Locativo arquitectónico

Características de las estructuras e instalaciones que pueden causar daño a las personas. En la planta se puede observar peligros de este tipo tales como: escaleras y barandas ausentes o no estandarizadas; defectos en el piso (pisos lisos, irregulares, húmedos); alturas insuficientes; obstaculización de la visión; aislamiento; acceso o vías de tránsito restringido u obstaculizado; y acceso o vías de tránsito inadecuado u obstaculizado.

✓ Locativo almacenamiento

Características de almacenamiento que pueda causar daño a las personas. En la planta se puede observar peligros de este tipo tales como: apilamiento

inadecuado; vías de tránsito o de acceso estrechos dentro de almacenes; almacenamiento con incompatibilidad de sustancias químicas; ventilación deficiente o nula; y confinamiento inapropiado.

✓ Locativo de seguridad

Características de las barreras, mecanismos o señaléticas de seguridad que no evitan el daño a las personas. En la planta se puede observar peligros de este tipo tales como: desconocimiento o difusión ineficiente; falta de barreras de seguridad o señalética; barreras de seguridad o señalética deteriorada o gastada; barreras de seguridad o señalética insuficiente; barreras de seguridad o señalética inadecuada; barreras de seguridad o señalética equivocada; y falta o falencia de sistema contra incendios.

7. Conductuales

Es el peligro que proviene del comportamiento, estado de salud (física o mental) o nivel de conocimiento de las personas consideradas como actos inseguros que pueden producir un daño a sí mismo o a otras personas (Marcelo, 2016). Estas pueden ser por:

- ✓ Estado de salud: etilismo, somnolencia, fatiga mental, fatiga corporal, disfunción orgánica, limitación de movimiento, enfermedad ocupacional o enfermedad no relacionada con el trabajo.
- ✓ Comportamiento: exceso de confianza, incumplimiento voluntario de procedimientos, estándares o normas de seguridad, distracción o desconcentración.
- ✓ Nivel de conocimiento: falta de capacitación, asignación de tareas sin nivel de instrucción necesaria.

8. Naturales

Se refiere a fenómenos naturales; es decir, aquellos fenómenos no generados ni controlados por las personas. Pueden ser: terremoto, vendaval, tsunami, sequía y inundación.

1.2.2. Riesgos más frecuentes en la industria azucarera

Los factores de riesgos más grave en todas las áreas de producción de azúcar son: de seguridad en las áreas de trabajo, los ergonómicos, el ruido y las vibraciones (Falcon y Rojas, 2017).

✓ Riesgos relacionados con la maquinaria

Las máquinas utilizadas en los procesos de extracción o separación del azúcar funcionan continuamente, es decir, 24 horas al día, 7 días a la semana durante todo el año.

Estos equipos suelen ser numerosos y generan altos niveles de ruido durante las fases de trituración o limpieza. Estos elevados niveles de ruido pueden dañar el sistema auditivo, provocar malestar, falta de concentración o ser una fuente de estrés, afectando así la salud y seguridad de los operarios (Sidaoui, 2022).

Las máquinas utilizadas para producir azúcar pueden ser causa de accidentes graves (cortes, laceraciones, aplastamiento de manos y brazos, enrollamiento de la ropa, del pelo, etc) debido a las piezas móviles o giratorias.

✓ Riesgos biológicos relacionados con las emisiones de polvo

El polvo puede acumularse en muchos lugares y cubrir las superficies de trabajo, el tráfico, el suelo, las paredes del silo, los edificios, las bandejas de cables (cintas transportadoras, transportadores, estaciones de ensacado, bateo de máquinas, llenado de silos, etc) pero también se propaga más ampliamente a través del aire. Está presente, sobre todo, en los espacios reducidos de difícil acceso para la limpieza y el mantenimiento de los equipos (Sidaoui, 2022).

La emisión de polvo en las fábricas de azúcar expone a los trabajadores a agentes biológicos responsables de enfermedades infecciosas. También puede

provocar reacciones alérgicas graves debido al carácter neumalérgico de los mohos de la caña de azúcar presentes en las zonas de producción.

✓ Riesgos químicos y térmicos

Los diversos procesos de fabricación de azúcar implican altas temperaturas que pueden causar quemaduras o problemas respiratorios.

En varias operaciones de limpieza, clarificación decoloración o desinfección de equipos e instalaciones se utilizan productos químicos – detergentes, desinfectantes, decapantes, etc.-que pueden provocar importantes riesgos para la salud de los trabajadores. Entre ellos se encuentra la intoxicación, las quemaduras, las reacciones alérgicas, el asma e incluso los riesgos cancerígenos (Sidaoui, 2022).

Entre las sustancias responsables de estos problemas se encuentran el ácido fosfórico, la lechada de cal, el sulfoxilato de sodio, etc.

✓ Riesgos físicos

Todas las industrias implican riesgos físicos para los operarios que están relacionados con el uso de máquinas y equipos adicionales, la disposición de los puestos de trabajo o el entorno laboral.

Los trabajadores están expuestos al riesgo de caídas que pueden provocar lesiones debido a que los suelos y las escaleras suelen estar mojados o resbaladizos por la presencia de suciedad y derrames de líquidos.

Los procesos de trituración y rallado presentan peligros en términos de cortes y abrasiones con el riesgo de sobre infección y ataques de pánico.

En las fases de limpieza y desinfección de las máquinas y los locales que implican posturas incómodas o un alto nivel de tensión en determinadas extremidades.

Durante el período de reparación el riesgo de seguridad es alto asociado las fuentes generados de trabajos en altura, ausencia de capacitación y falta de uso adecuado de los equipos de protección personal (Falcon y Rojas, 2017).

1.3. Riesgos producidos por alteración en la composición de las corrientes. Repercusión y causas que lo originan

La operación industrial en el central azucarero se ve influenciada por una serie de factores que afectan la eficiencia industrial e incrementan los costos operacionales. Entre ellos se encuentran: calidad de la materia prima; infecciones por microorganismos a lo largo del proceso; pérdidas de azúcar en bagazo, cachaza y mieles finales; incrustaciones que aparecen en las superficies de intercambio de calor; y altas viscosidades que afectan los procesos de purificación, transferencia de calor, cristalización y centrifugación.

1.3.1. Influencia de la presión en la composición del jugo en el proceso de extracción en los molinos

La composición del jugo que se extrae de la caña está influenciada por la magnitud de la presión con que éste es extraído (Pedrosa, 1975). Ruiz (1952), señala que el mayor porcentaje de extracción de proteínas y péptidos ocurre en la desmenuzadora y el primer molino, mientras que la extracción de aminoácidos aumenta hacia el sexto molino.

A presiones moderadas las paredes celulares se rompen, dejando escapar el jugo puro de las celdas, pero a presiones mayores comienzan a ser extraídos jugos impuros del protoplasma y de la corteza (Pedrosa, 1975; Ruiz, 1952).

En todo caso la presión hidráulica aplicada a cada molino, debe ser suficiente para lograr el nivel de extracción requerido a un costo conveniente (Hamill, 1972). Hugot (1986), varió simultáneamente las presiones en todos los molinos y verificó la hipótesis de que las altas presiones favorecen el proceso de extracción, determinó que al incrementar la presión hidráulica (depende de las características técnicas y condiciones de molienda en el molino) en el molino, aumenta el consumo de potencia, así como el desgaste en chumaceras y engranajes.

Cuando la desinfección y limpieza de los molinos es descuidada, puede formarse dextrana en los tanques de alcalizar ocasionando pérdidas de azúcar, cristales de azúcar en forma de agujas, aumento de viscosidad, tupiciones en las instalaciones etc (Arca, 1988).

1.3.2. Influencia de la temperatura en el proceso de purificación

Según Hugot (1986), la carbonatación no deberá hacerse jamás a una temperatura superior a los 55 °C, máximo admisible si se desea evitar la destrucción de la sacarosa. Por otro lado, debajo de los 45 °C la reacción es muy lenta e incompleta. Deberá entonces tratar de acercarse a 55 °C y para conservar un margen de seguridad en ambos sentidos la temperatura debe mantenerse en general, en los 50 °C.

Esta temperatura se obtiene realizando una doble carbonatación o una alcalización fraccionada. Las razones que condujeron a la doble carbonatación son las siguientes:

- ✓ Si se lleva esta acción hasta el final, las sales de cal insolubles que se forman se descomponen y se integran en solución con el jugo; luego se filtra para eliminar dichas sales y poder continuar la carbonatación o comenzar otra vez una segunda que se llevará hasta muy cerca del punto neutro.
- ✓ Los gruesos trozos de cal, mal deslavados, pueden continuar fundiéndose lentamente después de una primera carbonatación y llevar la solución poco a poco a una reacción alcalina. Al pasar el jugo a los calentadores, se descompone la glucosa (los azúcares reductores se descomponen cuando el pH y la temperatura son elevados), y el jugo vuelve a colarse. La primera filtración y la segunda carbonatación eliminan los trozos de cal y estabilizan el pH.

Los calentadores deben mantenerse siempre lo más limpio posible para evitar incrustaciones excesivas ya que a medida que los calentadores se van ensuciando o incrustando, la transmisión de calor va disminuyendo y por consiguiente la temperatura del jugo puede disminuir a valores inaceptables (Arca, 1988).

1.3.3. Influencia de la presión y la temperatura en el múltiple efecto

En el proceso de fabricación de azúcar es necesario eliminar agua al jugo, a fin de aumentar su concentración desde 14 hasta 65 °BX y esto no se lleva a cabo en un solo evaporador, sino en una batería conocida en general como múltiple efecto y que puede tener de (3 a 5) vasos.

La utilización del múltiple tiene el inconveniente de aumentar el costo de la instalación, al tener que incorporar equipos para vacío, pero presenta dos grandes ventajas (Hugot, 1986):

1. A medida que disminuye la presión, se necesita un menor incremento de vacío para lograr la misma disminución de la temperatura de ebullición.
2. Permite continuar la evaporación a temperaturas menos peligrosas desde el punto de vista de inversión de la sacarosa y de la producción de sustancias colorantes. En general se afectan menos las propiedades organolépticas (color, olor, sabor) de los jugos.

La temperatura juega un papel importantísimo en la transferencia de calor y por tanto en la evaporación, ya que, por medio de las diferencias de temperaturas entre la calandria y el cuerpo se puede conocer, si el vaso está limpio, si está sucio, si evapora bien o no, si llegó al estado de equilibrio con los demás vasos o no. También la temperatura es la fuerza que impulsa al calor existente en el vapor para que se transfiera al líquido (Morrell, 1985).

1.4. Conclusiones Parciales

1. De acuerdo con la gestión de riesgos químicos se determinó que dos de los métodos más utilizados para realizar valoraciones cualitativas de riesgo son: Análisis de Modos y Efectos de Fallos (FMEA) y el Análisis de Peligro y Operabilidad (HAZOP).
2. Los riesgos de mayor incidencia en la industria azucarera son los riesgos físicos, térmicos y mecánicos.

3. A partir del análisis de los métodos generalizados se decide aplicar el método de Análisis de Modalidades de Fallas y sus Efectos (FMEA) en el proceso objeto de estudio.

Capítulo II. Materiales y Métodos

En este capítulo se realiza la descripción del proceso de producción de azúcar crudo objeto de estudio. Además, se muestran los procedimientos necesarios para dar cumplimiento a los objetivos del presente trabajo.

2.1. Descripción del proceso objeto de estudio

El caso de estudio lo constituye el central azucarero “Jesús Sablón Moreno”, perteneciente al municipio de Calimete en la provincia Matanzas, en el anexo 1 se muestra el diagrama del proceso. El proceso de producción de azúcar crudo implica las siguientes etapas para elaborar el producto final: preparación y molienda, purificación, evaporación, cristalización y centrifugación.

2.1.1. Etapa de preparación y molienda

El proceso de producción de azúcar comienza en los cañaverales, ya que es donde se forma la sacarosa, fuente de materia prima en los ingenios azucareros. Se puede definir como un sistema no estacionario. Existe acumulación, el ingenio tiene procesos discontinuos y otros que ocurren en equipos de gran volumen de trabajo. El tiempo de residencia de un material en el proceso completo oscila entre la 20 h y las 24 h en dependencia de las capacidades disponibles en el central y de la eficiencia en la operación. A menor tiempo de residencia menor posibilidad de pérdidas de sacarosa y por tanto mayor rendimiento y eficiencia. La materia prima tiene que satisfacer un conjunto de requisitos de calidad, ya que la industria al procesarla tiene que ser capaz de obtener una producción estable con la calidad y eficiencia.

La caña se recibe en camiones, se pesa y pasa al basculador, donde se prepara para facilitar la extracción del jugo. La preparación consiste en trozar y triturar la caña, la cual se conduce por medio de una estera hacia el tándem de molinos. El primer molino extrae el jugo primario de mayor concentración de sacarosa, mientras que el bagazo pasa por los restantes molinos para continuar la extracción del jugo. Para una mejor extracción y evitar el desarrollo microbiano se añade agua de imbibición antes de pasar al último molino, la cual debe estar alrededor de los 70 °C; el jugo extraído pasa por un proceso de recirculación del quinto molino

al cuarto y así, sucesivamente hasta el segundo, de este último se obtiene el jugo diluido. Luego, el jugo primario y el diluido se unen, formando el jugo mezclado, el cual pasa por un filtro colador para separarlo de las partículas sólidas. Todo el bagazo obtenido se separa hacia a un conductor de banda que lo eleva al rastrillo repartidor que alimenta las calderas.

2.1.2. Etapa de purificación

La etapa de purificación comprende varias subetapas, donde se involucra: la alcalización, calentamiento, filtración y clarificación.

El jugo mezclado es turbio y ácido, con un pH alrededor de 5,2 a 5,7; para eliminar estas características se somete a la etapa de alcalización. Se introduce el jugo en un tanque y se le adiciona lechada de cal diluida, con una concentración de 500 a 650 gramos por tonelada de caña molida, con el objetivo de aumentar el pH del jugo entre 7,5 y 8,1 para evitar la inversión de la sacarosa y favorecer el proceso de coagulación.

Luego, el jugo alcalizado pasa por varios calentadores, primarios, secundarios y rectificadores, cuya función es elevar la temperatura del jugo ligeramente por encima del punto de ebullición para favorecer el proceso de coagulación de las impurezas y su posterior eliminación en la etapa de sedimentación.

La clarificación tiene como objetivo eliminar la mayor cantidad posible de impurezas en suspensión, coloidales y solubles mediante la sedimentación. El jugo alcalizado se mezcla con floculante para completar la reacción de formación y sedimentación de los flóculos de fosfato tricálcico, donde se logra una separación en dos corrientes: una contiene el jugo claro y la otra contiene el sedimento. Esta última corriente no se desecha, debido a que presenta un alto contenido de sacarosa, por ello se realiza un proceso de filtración de ese lodo en los filtros rotatorios al vacío. De aquí se obtienen nuevamente dos corrientes: un jugo filtrado, de calidad intermedia que se recircula al tanque de alcalizar y un residual al que comúnmente se llama cachaza.

2.1.3. Etapa de evaporación

La etapa de evaporación está formada por un pre-evaporador y un múltiple efecto, en ella se evapora el agua contenida en el jugo clarificado. El múltiple efecto funciona bajo el principio de Rillieux para obtener una disolución más concentrada, pero sin llegar a la saturación. El producto final que se obtiene en este proceso es la meladura la cual posee aproximadamente 62 °Brix y una pureza de 85 %.

2.1.4. Etapa de cristalización y centrifugación

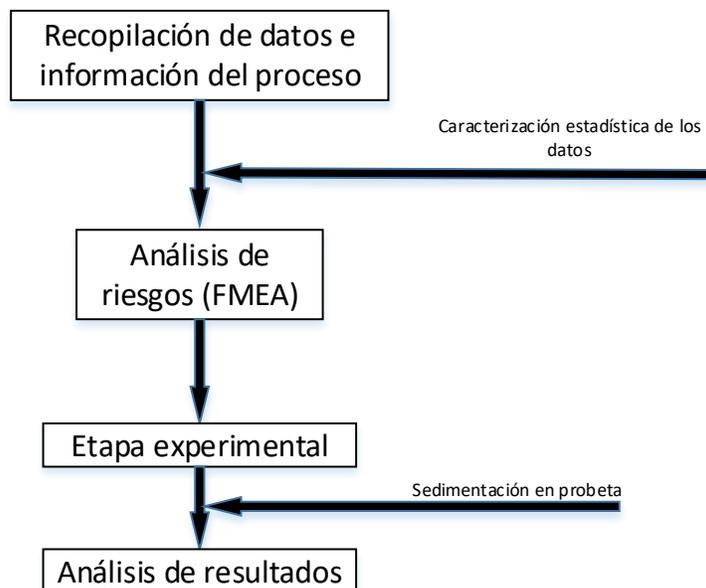
Para cristalizar la sacarosa se requiere elevar su concentración por encima de aquella correspondiente a una solución saturada, y llevarla en forma regulada y con precisión a la concentración requerida para lograr la cristalización. Dicho proceso ocurre en los tachos y la industria cuenta con siete, los cuales trabajan a simple efecto.

El sistema de masas cocidas que se emplea es el de tres masas cocidas con doble semilla, la elaboración de las masas cocidas en tachos se trabaja de la forma siguiente: la MCA se elabora con semilla B y meladura, la MCB se elabora con semilla C y miel A, la MCC se elabora con grano mejorado y miel B, el grano mejorado se elabora a partir del grano fino y miel B; el grano fino se elabora a partir de una cristalización a 82 % de pureza como mínimo y miel A, se adiciona miel B si las purezas son muy altas.

La centrifugación tiene como objetivo separar los granos de azúcar de la miel, el material de entrada al proceso son las masas cocidas procedentes de la cristalización. En el caso de las masas comerciales, esta separación produce un azúcar con más del 98 % de pureza y granos con suficiente tamaño, alrededor de 0,65 a 0,80 mm para su comercialización, mientras que las mieles obtenidas de la separación (A y B) retornan al proceso para ser agotadas. En el caso de las masas de agotamiento, el azúcar centrifugado se retorna hacia los tachos (como semilla), pues su tamaño es del orden de los 0,25 a 0,40 mm y su pureza inferior al 90 % no constituyen un producto apto para la comercialización y la miel agotada como producto final se entrega a los tanques de almacenamiento.

2.2. Descripción del caso de estudio

El esquema de trabajo desarrollado durante la investigación se muestra en la siguiente figura:



La recopilación de datos e información sobre el proceso se realiza durante la zafra 2021-2022, en el mes de marzo, durante un período de 6 días.

2.2. Caracterización de indicadores de la producción

La caracterización de los indicadores de la producción se emplea para analizar el comportamiento de los datos recogidos en la industria. Dentro de los parámetros de interés están: los de medidas de tendencia central, medidas de dispersión y medidas de simetría, entre cada uno de ellos hay una gran variedad de parámetros, solamente se estudian los más significativos para la investigación. Los parámetros de medidas de tendencia central caracterizan el centro de la distribución de los datos experimentales, entre ellos la media. Según Guerra y Sevilla (1986), la media se acerca al valor verdadero único de lo que se mide, teniendo en cuenta que en la medición siempre hay errores. Los parámetros de medidas de dispersión reflejan cuan alejados están los valores experimentales del valor central, entre ellos está: el coeficiente de variación, indicador del grado de dispersión de la muestra (Guerra *et al.*, 2004; Montgomery, 2017).

2.3. Aplicación de la técnica de análisis de riesgos FMEA

El sector azucarero puede ser afectado por eventos negativos o positivos, convirtiéndose los primeros en riesgos y los segundos en oportunidades o acciones de mejora. Los eventos pueden ser por factores internos o externos y pueden tener un impacto positivo, negativo o de ambos tipos a la vez.

La técnica de Análisis de Modos y Efectos de Fallos (FMEA) se utiliza para evaluar el comportamiento tecnológico sobre la seguridad del proceso. Se selecciona de acuerdo a su amplia aplicación, facilidad, y permite asignar puntuación de acuerdo al nivel de afectación.

El FMEA es considerado un método analítico para detectar y proponer medidas para eliminar problemas, cuyos objetivos principales son:

- ✓ Reconocer y evaluar los modos de fallas potenciales y las causas asociadas con el diseño y manufactura de un producto.
- ✓ Determinar los efectos de las fallas potenciales en el desempeño del sistema.
- ✓ Identificar las acciones que podrán eliminar o reducir la oportunidad de que ocurra la falla potencial.
- ✓ Analizar la confiabilidad del sistema.
- ✓ Documentar el proceso.

Para realizar un análisis de modos y efectos de fallos se utiliza la siguiente metodología:

1. Definir el sistema y sus características.
2. Identificar todos los modos de fallos relevantes y los efectos que producen.

El modo de fallo se define como la manera en que una parte puede potencialmente fallar en cumplir con los requerimientos específicos del proceso. Para su análisis se hace una lista de cada modo de fallo potencial para la operación en particular, considerando que cada falla debe ser clasificada como falla total, falla parcial, falla intermitente, falla gradual o sobre funcionamiento.

Para evaluar la seriedad de las consecuencias se puede utilizar el índice de gravedad o calcular el número de prioridad del riesgo (NPR). En este trabajo se

utiliza el método del NPR y para registrar dichos resultados el modelo se ofrece en la tabla 2.1.

Tabla 2.1. Formato empleado para registrar los resultados de la aplicación de FMEA.

Equipo	Descripción del equipo	Modo de fallo	Forma de detectar el fallo	Efecto de fallo	O	S	D	N P R	Acciones para corregir

El efecto de fallo se define como el resultado de un modo de fallo en la función del proceso. Se deja constancia de los efectos tal como los experimenta el usuario. La incidencia (O) se determina con qué frecuencia puede ocurrir el suceso, asignándose un valor entre 1 y 10, siendo el 1 improbable y el 10 altamente probable. Para ello se realizan observaciones y se calcula el porcentaje de ocurrencia del suceso. La severidad (S) permite evaluar cada efecto de fallo entre 1 (sin peligro) a 10 (crítico). Permite priorizar los modos de fallo y sus efectos. Mientras mayor sea la severidad de un efecto, mayor atención se debe tener en la actividad del proceso. Este indicador se evalúa a través de observaciones realizadas sobre el efecto de fallo, se procesarán de forma estadística y se relacionarán con los valores antes mencionados. El nivel de detección (D) es necesario conocer si existe un mecanismo de detección y como funciona este. Se asigna un valor entre 1 y 10, siendo el 1 el mecanismo de detección existe y funciona de forma eficaz y 10 que el mecanismo de detección no existe o no funciona.

El número de prioridad del riesgo (NPR) se obtiene por la ecuación 2.1, este da una medida del Nivel de Riesgo del suceso que se está analizando, siendo el indicador para tomar decisiones sobre el proceso.

$$NPR = O * S * D$$

Ec. 2.1

2.4. Etapa Experimental

En la clarificación se eliminan la mayor cantidad de impurezas en suspensión, coloidales y solubles, mediante la sedimentación de las mismas. Esta etapa es una de las más importantes, puesto que de una buena clarificación del jugo depende una eficiente operación y rendimiento del sistema, en las etapas subsiguientes como evaporación, cocimiento, cristalización, agotamiento, etc (Martínez y Nemirovitch, 1985). En función de lo anterior se procede a realizar pruebas de sedimentación al jugo alcalizado para estudiar el efecto de esta operación en los parámetros de calidad que se muestran en la tabla 2.2.

Tabla 2.2. Fuente de las pruebas de calidad para evaluar el proceso de sedimentación.

Indicador de calidad	Técnica de medición	Ver
Contenido de almidón (ppm)	MACU (2008)	Anexo 2
Brix		Anexo3
Pol		Anexo 4
Insolubles		Anexo 5
pH	pH-metro	
Reductores	Benfeld (1955)	Anexo 6

2.4.1. Sedimentación

Para el desarrollo de esta operación se utiliza la técnica de sedimentación en probeta descrita por Rosabal (1998) para equipos continuos, como se indica a continuación:

En una probeta graduada, se añade 5 mL de floculante y se agrega 1 L de jugo alcalizado previamente calentado hasta 100 °C. Se procede a medir cada minuto la altura de la superficie que separa el líquido claro que sobrenada, de la capa que contiene el sólido en suspensión.

Capítulo III. Análisis de los resultados

En el presente capítulo se exponen los resultados de la caracterización estadística de los parámetros operacionales y de calidad, de la realización del análisis de efecto y modos de Fallo (FMEA) y el efecto de la sedimentación los mismos.

3.1 Análisis de parámetros por área

En el anexo 7, se observan los valores de los parámetros que se miden durante los 6 días de realizado el estudio. A continuación, se muestran los resultados de la caracterización estadística de los mismos.

3.1.1 Área de Extracción

En la tabla 3.1 se muestran los valores de media, desviación estándar y coeficiente de variación correspondientes a las variables de esta área.

Tabla 3.1. Caracterización estadística del área de Extracción.

Variables	Media	Desviación Estándar	Coeficiente de variación (%)
Temperatura del agua de imbibición (°C)	62.34	7.37	11.82
Pérdidas en bagazo	8.49	2.20	25.93
Contenido de almidón en Jugo Mezclado (ppm)	640.94	34.55	5.39

Como se observa en la tabla 3.1, de las tres variables las pérdidas en bagazo es la única que presenta un coeficiente de variación superior al 12 %. El porcentaje de pérdidas en la etapa de extracción es de 8.49 % y se conoce que no deben sobrepasar el 6 %. Esta alta dispersión puede deberse a numerosos factores como son: un elevado contenido de fibra en el material leñoso, una mala preparación de la caña, bajas presiones en los molinos, temperatura y flujo de agua de imbibición inadecuadas.

La media de la temperatura del agua de imbibición es 62.34 °C. Temperaturas entre 75 y 80 °C, facilitan la extracción de sacarosa y evitan el desarrollo microbiano (Pedrosa, 1975), valores superiores provocan la extracción de cenizas, dextranas y almidón que afectan la cristalización y calidad del azúcar. Para valores de temperatura inferiores a 60 °C no se logra un agotamiento considerable de la Pol en el residuo leñoso. Hugot (1986), recomienda que la misma no exceda los 85 °C para evitar la incorporación de ceras al jugo.

El contenido de almidón medio en el jugo mezclado posee un valor de 640.94 ppm. El contenido de almidón en esta primera etapa depende de las características y variedad de la caña que se procesa (Godshall *et al.*, 1990); así como de la cantidad de materia extraña formada por hojas y cogollos, fuente principal de entrada de almidón al proceso. Entre los efectos negativos de este parámetro en el proceso tenemos los siguientes: aumento de la viscosidad de los jugos, demora e inhibe la cristalización, impide el agotamiento de las mieles y dificulta la purga en las centrífugas, provoca pérdidas de sacarosa por modificaciones en el crecimiento del cristal.

3.1. 2 Área de Purificación

En la tabla 3.2 se reflejan los valores de la caracterización estadística de las variables del área.

Según la información de la tabla 3.2 dos parámetros presentan un coeficiente de variación superior a 12 % que son las pérdidas en cachaza y los insolubles del jugo filtrado.

Tabla 3.2. Caracterización estadística del área de Purificación.

Variables	Media	Desviación Estándar	Coefficiente de variación (%)
Temperatura de agua de lavado del filtro (°C)	79.58	0.65	0.812
Temperatura total de los calentadores (°C)	103.35	3.23	3.12
Pérdidas en cachaza (%)	1.17	0.23	20.05
Insolubles en jugo filtrado	0.73	0.52	71.44
Humedad en la cachaza	69.73	1.69	2.43
Contenido de almidón en Jugo Clarificado (ppm)	110.78	8.20	7.40

Jenkins (1971), hace referencia a que los valores óptimos de Pol en cachaza que se encuentran cercanos al 1 %, mientras Martínez y Nemirovitch (1985), consideran que los valores de Pol en cachaza para lograr pérdidas no sensibles en el proceso no deben excederse de 3.5 %. En el caso del período de estudio las pérdidas en cachaza tuvieron un valor promedio de 1.17 %, además se puede observar que la variable presenta una variación de un 20.05 %, por lo que los datos presentan una alta dispersión. Sobre esto inciden factores como: las características físicas y mecánicas de la torta, la cantidad y temperatura del agua de lavado, la uniformidad de aplicación del agua de lavado a la torta, la relación cantidad de agua de lavado y cantidad de torta, la cantidad y calidad del bagacillo que se adiciona el lodo, la presión de vacío y la velocidad de rotación de los filtros.

Los insolubles en el jugo filtrado tienen un valor promedio de 0.73 % y un coeficiente de variación de 71.44 %. Valores elevados de este parámetro indican un adecuado proceso de clarificación y filtración, pues se eliminan gran parte de las impurezas que entran al proceso. Contrariamente bajos valores de insolubles en jugo filtrado son indicativos de problemas en estas etapas, que pueden ser causados por: mal acondicionamiento del jugo mezclado, incorrecta adición de

floculante y lechada de cal al jugo, y los factores que inciden en las pérdidas en cachaza.

Según Arca (1988), la humedad % en cachaza generalmente debe estar en el rango de 75 a 80 %. En el caso de la central toma un valor de 69.73 %, esta depende fundamentalmente de la cantidad de agua de lavado, la presión de vacío y el tiempo de secado en el filtro. En la práctica suele decirse que una humedad alta en la cachaza corresponde a una Pol alta y viceversa.

El contenido de almidón en jugo clarificado posee un valor de 110.78 ppm, disminuye con respecto al jugo mezclado. Verificándose que durante la clarificación se remueve parte del almidón que entra al proceso y la mayor parte de este queda en los lodos. El almidón soluble se elimina parcialmente en la clarificación, mientras el almidón insoluble precipita en mayor cantidad. Esto se debe al efecto de la sedimentación de las partículas de alto peso molecular, proceso que se produce con la adición de la sustancia floculante, la cual aumenta el peso molecular de las partículas y como consecuencia precipitan al fondo de los clarificadores.

3.1.3 Área de Cristalización

En la tabla 3.3 se muestran los valores de media, desviación estándar y coeficiente de variación correspondientes a las variables del área.

Como se aprecia en la tabla 3.3 las pérdidas en indeterminados presentan más de un 12 % de coeficiente de variación. Esto se debe a que las mismas pueden estar ocasionadas por errores en el proceso productivo como mala alcalización que conlleve a la inversión de la sacarosa, calentamiento excesivo, indisciplinas tecnológicas, entre otras.

Tabla 3.3. Caracterización estadística del área de Cristalización.

Variab les	Media	Desviación Estándar	Coficiente de variación (%)
Contenido de almidón en Meladura	102.51	4.95	4.83
Bx meladura	63.46	0.59	0.93
Pérdidas en miel	10.02	1.41	14.02
Pérdidas en indeterminados	2.25	1.16	51.55
Recobrado	78.22	2.36	3.02
Rendimiento	8.84	0.63	7.17

Según Morrell (1985), el jugo que entra a la etapa de evaporación debe tener entre 15 – 20 °Bx mientras que la salida debe estar entre 55 – 65 °Bx. Según Hugot (1986), el Brix de la meladura debe estar aproximadamente entre 60-68 °Bx. Según la tabla 3.3, la meladura tiene un Brix promedio de 63.46 lo que implica un buen funcionamiento de la etapa de evaporación, obteniéndose una meladura de calidad y apta para la cristalización. Si el Brix del jugo de entrada no se encuentra en norma, aumenta el consumo de vapor pues hay una mayor cantidad de agua y si las condiciones finales no son las requeridas puede ocasionar problemas, puesto que por debajo existe la probabilidad de suciedad en el equipo, y un valor en exceso es susceptible a provocar incrustaciones y en ocasiones provocar la cristalización.

El rendimiento de azúcar en caña se define como las toneladas de azúcar producidas por toneladas de caña molida, expresadas en porciento. El valor del rendimiento depende del período de zafra y las condiciones climáticas, y deber ser superior al 10 %, son considerados valores excelentes alrededor del 12 % (Honig, 1987; Hugot, 1986; Pedrosa, 1975). En la etapa analizada se alcanza un valor inferior al reportado en la literatura 8.84 %. Entre los factores que influyen en un bajo rendimiento se encuentran la temporada de lluvia, la materia prima

particularmente la Pol en caña, y como factor determinante el proceso productivo en su conjunto.

El recobrado indica la cantidad de sacarosa que se recupera como azúcar respecto a la que entró con la caña, en el periodo de análisis este presente un valor promedio de 78.22 %, lo que indica una baja eficiencia, ya que para considerarse idóneo debe encontrarse por encima de 80 %, según consultas con el profesor Dr. Jesús Luis Orozco. Las principales causas de que no se logre un recobrado satisfactorio viene dado por las pérdidas de sacarosa en cachaza, en bagazo, en miel final, unido a las pérdidas indeterminadas. Teniendo en cuenta que es un indicador de eficiencia de la industria se puede asegurar que es bajo el valor obtenido.

El almidón no se genera en el proceso, solo existe el que entra con la caña. Durante la evaporación ocurre la gelatinización del almidón, dispersándose completamente en el jugo. El contenido de almidón medio en la meladura presenta un valor de 102.51 ppm. Según Penados (2004), si la cantidad de almidón que pasa a la meladura es mayor de 150 ppm comienzan a existir afectaciones en el proceso.

3.1.4. Producto Final

En la tabla 3.5 se reflejan los valores de la caracterización estadística del contenido de almidón en el producto final.

Tabla 3.5. Caracterización estadística del Producto Final.

Variable	Media	Desviación Estándar	Coficiente de variación (%)
Almidón en azúcar (ppm)	273.60	30.41	11.12

Como se observa en la tabla 3.5, el contenido de almidón medio en el azúcar crudo es de 273.60 ppm. Concentraciones de almidón superiores a 250 ppm en el

azúcar, afectan el proceso de refinación de la misma, por lo que se establecen penalizaciones para azúcares que incumplan esta norma.

3.2. Análisis de la repercusión del FMEA

En el mundo competitivo en que las empresas productivas y de servicio se desenvuelven, se presenta la lucha permanente por reducir costos, hacer productos de calidad, cumplir los programas de producción y las leyes, entre otros aspectos.

Para minimizar los riesgos que indudablemente se pueden producir como consecuencia de esta necesidad y del incremento del comercio internacional, es necesario entonces que la producción, el abastecimiento, la comercialización, manipulación y consumo se realicen en condiciones suficientes de higiene, para que los productos resultantes sean inocuos y de calidad; todo ello a fin de garantizar la salud de los consumidores y propiciar su comercio.

El método de Análisis de Modos de Falla y Efectos (FMEA) permite identificar los posibles fallos que puede incidir en las etapas del proceso de producción, sus efectos y se propone las medidas correctivas. Atendiendo al NPR, mientras mayor sea dicho valor, mayor atención se le debe prestar por parte de los operarios. En el anexo 8 se muestran los resultados de la determinación de los valores de incidencia y severidad para cada variable.

En los anexos del 9 al 12 se muestran los resultados de la aplicación del FMEA en las áreas de extracción, purificación, cristalización y en el producto final. Se observan que los mayores números de prioridad de riesgos son de 600 y 700, que corresponden a las variables contenido de almidón en jugo mezclado y a las pérdidas de sacarosa en miel y bagazo. Estos valores demuestran la peligrosidad de los efectos de fallos y sus consecuencias sobre la eficiencia y la calidad del proceso.

Garantizar la no ocurrencia de los fallos detectados es tarea de los operarios y para ello se debe realizar una capacitación periódica, facilitar los manuales y las

investigaciones realizadas en dicho proceso, lograr una mejor instrumentación y realizar mantenimientos periódicos.

3.3. Análisis de la etapa experimental

En el anexo 13, se muestran los resultados de la medición de la altura del sedimento en función del tiempo, para tres muestras de jugos distintas. En la figura 3.1 se representa gráficamente los resultados de dichos experimentos.

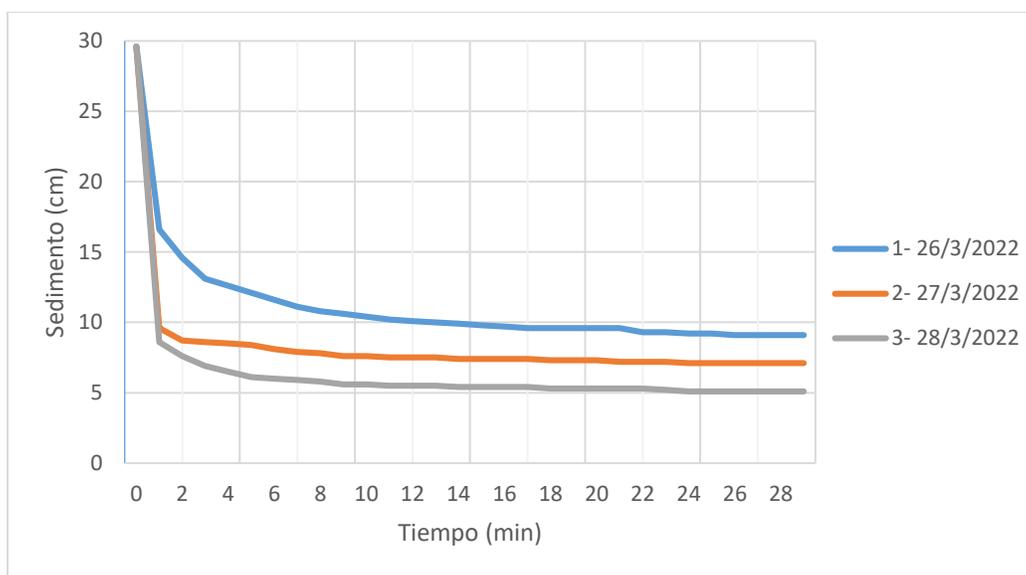


Figura 3.1. Variación de la altura del sedimento en el tiempo.

La operación de sedimentación consiste en separar en una suspensión el fluido claro sobrenadante de las partículas sólidas, las cuales forman un lodo con una elevada concentración de dichas partículas (Medina, 2018). En la figura 3.1 se aprecia la compactación del sedimento en el tiempo, y que a partir de los 10 min la variación de este parámetro no es significativa. Además, es evidente que la cantidad de impurezas en el jugo el día 1 es superior al 2, y esta a su vez al 3. En la tabla 3. se muestran los resultados de la medición de varios parámetros de calidad en el jugo, antes y después de la operación de sedimentación.

Tabla 3.6. Indicadores de calidad del jugo.

Variables	Jugo Alcalizado			Jugo Claro		
	1	2	3	1	2	3
Días						

Capítulo III. Análisis de los resultados

Contenido de almidón (ppm)	434.07	355.76	320.47			
pH	8.19	7.32	5.87	7.16	6.53	5.76
Brix	13.53	15.86	12.61	14.52	15.95	12.79
Pol	11.29	13.85	10.31	11.8	14.58	10.83
Insolubles	0.98	0.78	0.22	0.29	0.29	0.05
Reductores (μmol glucosa/mL)	32.87	35.69	50.25	24.39	29.75	31.08

En la tabla 3.6, se aprecia que el jugo del primer día presenta un mayor contenido de almidón que el resto, mientras que en el tercer día presenta el menor contenido de este. Lo anterior podría ser parte de la causa de la existencia de una mayor cantidad de impurezas el día 1. El almidón no se genera en el proceso, sino que depende de las características y variedad de la caña, así como de la cantidad de materia extraña (hojas y cogollos) que entra al mismo. Según Medina (2018), mientras menor es la viscosidad del fluido, mayor será la velocidad de sedimentación, y por tanto es necesario un menor tiempo de retención para llevar a cabo la operación. El proceso de gelatinización de los gránulos de almidón que sucede cuando se calienta el jugo, causa un aumento en su viscosidad, como consecuencia la velocidad de sedimentación se reduce con el aumento del contenido de almidón.

El Brix y el Pol pueden ser definidos como el porcentaje aparente de sólidos solubles y de sacarosa respectivamente contenidos en una solución azucarada. Por eso era de esperar que el valor de ambos aumentará luego de la operación de sedimentación por la precipitación de las impurezas.

El calentamiento del jugo alcalizado, provoca el aumento de la velocidad de las reacciones del ácido fosfórico y la cal, lo que resulta en un aumento en la concentración del ión hidrogeno, una de las razones por la cual el pH del jugo disminuye (Pedrosa, 1975).

Capítulo III. Análisis de los resultados

El menor valor de insolubles en el jugo claro era de esperar, pues por efecto de la sedimentación, precipitan las impurezas orgánicas e inorgánicas (reductores, sales, dextranas, almidones etc). La disminución de los reductores se debe además de lo anterior, al efecto del pH en la destrucción de los mismos, como se aprecia en el anexo 14 a medida que aumenta el pH del jugo alcalizado, se incrementa el porcentaje de azúcares reductores destruidos.

Conclusiones

1. Con la realización de la técnica de análisis de Modos y Efectos de Fallos (FMEA), se detectó el efecto del contenido de almidón y otras variables en el proceso, proponiéndose las medidas correctivas necesarias, lo que corrobora la hipótesis planteada.
2. La presencia del almidón en la industria demora o inhibe la cristalización, aumenta las pérdidas de sacarosa en la miel final y por modificaciones en el crecimiento del cristal, entre otras.
3. Los parámetros de mayor prioridad de riesgo que se obtienen son el contenido de almidón en el jugo mezclado, las pérdidas de sacarosa en miel y bagazo.
4. Se determinó que el incremento de la viscosidad del jugo por la presencia del contenido de almidón, causa una reducción en la velocidad de sedimentación de las impurezas.

Recomendaciones

1. Aplicar otras técnicas de análisis de riesgo en la industria como HAZOP, Árbol de sucesos que unido a los resultados obtenidos por el FMEA posibilitarán completar el análisis de riesgos e implementar nuevas medidas para un mejor control de calidad.
2. Capacitar a todo el personal de la EAA sobre la base de los resultados obtenidos en la presente investigación.

Referencias Bibliográficas

1. Arca, Manuel P (1988). El Consultor Una Guía Práctica Para Solucionar Problemas En Fábricas de Azúcar de Caña.
2. Boza, Y.C. (2019). Análisis de los riesgos industriales en la Estación Cabecera del Oleoducto de la UEB de Producción (Proyecto de Curso). Universidad de Matanzas, Cuba.
3. Casal, J., Montiel, H., Plana, E., Vílchez, J.A. (2001). Análisis del Riesgo en Instalaciones Industriales, Ediciones UPC, SL, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España.
4. Castro Delgado R., y Arcos González P. (1998) El riesgo de desastre químico como cuestión de salud pública. Publicado por Revista Española de salud Pública; 72:481- 500. UIED. Universidad de Oviedo
5. Carol, S. (2001). Una nueva metodología para la predicción de la gravedad de los accidentes industriales. (Tesis de Doctorado). Departamento de Ingeniería Química, Escuela técnica superior de ingenieros industriales de Barcelona. España.
6. CCPS. (1992). Hazard Evaluation Procedures. American Institute of Chemical Engineers. New York, USA.
7. Cedeño, R. (2014). Análisis de Riesgo en la industria procesadora de cítricos UEB Héroes de Girón (Tesis de Pregrado). Universidad de Matanzas, Cuba.
8. Dirección General de Protección Civil. -b, (1994). Guía técnica. Métodos cualitativos para el análisis de riesgos. ISBN 84-8150-041-0. Ministerio de Justicia e Interior. Madrid
9. Dirección General de Protección Civil (D.G.P.C.). (1997a). Métodos para la identificación de riesgos químicos (V).
10. (D.G.P.C. 1997b) Dirección General de Protección Civil (1997) Métodos para la identificación de riesgos químicos (VI)

11. (D.G.P.C. 1997c) Dirección General de Protección Civil (1997) Métodos para la identificación de riesgos químicos (VII)
12. Dueñas Casas, S. (2020). Valoración de alternativas para el desdoblamiento enzimático de almidón en la industria azucarera (Tesis de Maestría). Universidad de Matanzas, Cuba.
13. Eggleston, G., Montes, B., Monge, A., y Guidry, D. (2006). Optimization of α -amylase application in raw sugar manufacture. *Processing of Sugar. Process. Res. Conf. Brazil*, vol., p. 319-340.
14. Falcon, M. y Rojas, D. (2017). Gestión de perfiles, mapas de riesgo y planes de acción para un trabajo seguro en la industria azucarera. Organización Nacional del trabajo, Mexico.
15. García Guirola, Amanda. (2021). Metodología para la evaluación del comportamiento de la disciplina tecnológica en el proceso de obtención de helado del Combinado Lácteo "Germán Hernández Salas" (Tesis de pregrado). Universidad de Matanzas, Cuba.
16. Godshall, M. A.; M. A. Clarke and C. D. Dooley. (1990). *Starch: process problems and analytical developments*. En: Proc. SPRI Conference, San Francisco, CA, USA.
17. González, M. (2015). Tecnologías y sistemas para el manejo de agua y condensados en la producción de azúcar. Departamento de Ingeniería Química, Facultad de Química y Farmacia, Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas.
18. Hamill, T. M. (1972). "Wet Milling Extraction Process and Apparatus Therefor". Patente 36 695 931 United States Patent Office.
19. Hernández Brizuela, María C. (2017). *Determinación y Evaluación de Riesgos en la Planta de Procesamiento de Crudo de la Empresa de Perforación y Extracción de Petróleo del Centro*. (Tesis de pregrado). Universidad de Matanzas, Cuba.

20. Hernández Pellán, Linnet. (2020). Evaluación del comportamiento de la disciplina tecnológica en el proceso de obtención de leche fluida pasteurizada en el Combinado Lácteo “Mártires del 29 de abril” de Matanzas. (Tesis de pregrado). Universidad de Matanzas, Cuba.
21. Honig, P. (1979). Principios de Tecnología Azucarera. Tomo I. Ed. Pueblo y Educación, La Habana.
22. Hugot, E. (1986). Handbook of cane sugar engineering. Elsevier, ISBN 0444-42438-5.
23. Jenkins, G. (1971). Introducción a la Tecnología del azúcar de caña. *Ediciones y Técnica*. Habana.
24. Knowlton R.E. (1981). An introduction to Hazard and Operability Studies. The Guide Word Approach. *Chemetics International*, Ltd.
25. MACU (Manual de métodos analíticos para azúcar crudo). (2008). Instituto Cubano de Investigaciones Azucareras. División de Aseguramiento de la Calidad.
26. Marcelo, J. (2016). *Evaluación de riesgo laboral del proceso de molienda de caña de azúcar* (Tesis de Pregrado). Universidad de Piura, Perú.
27. Martínez, N. y Nemirivitch, P (1985) Procesos de purificación del jugo en la industria azucarera Tomo II. Universidad de Camagüey, Cuba
28. Medina Rodríguez, Dariel. (2018). *Diseño de las etapas de separación y fraccionamiento de sustancias húmicas obtenidas a partir de cachaza y estiércol de ganado vacuno*. (Tesis de pregrado). Universidad de Matanzas, Cuba.
29. Montgomery, C. (2017). Design and Analysis of Experiments. Novena Edición. Arizona State University.
30. Morrell, Ignacio. (1985) Tecnología Azucarera. La Habana, Editorial Pueblo y Educación.

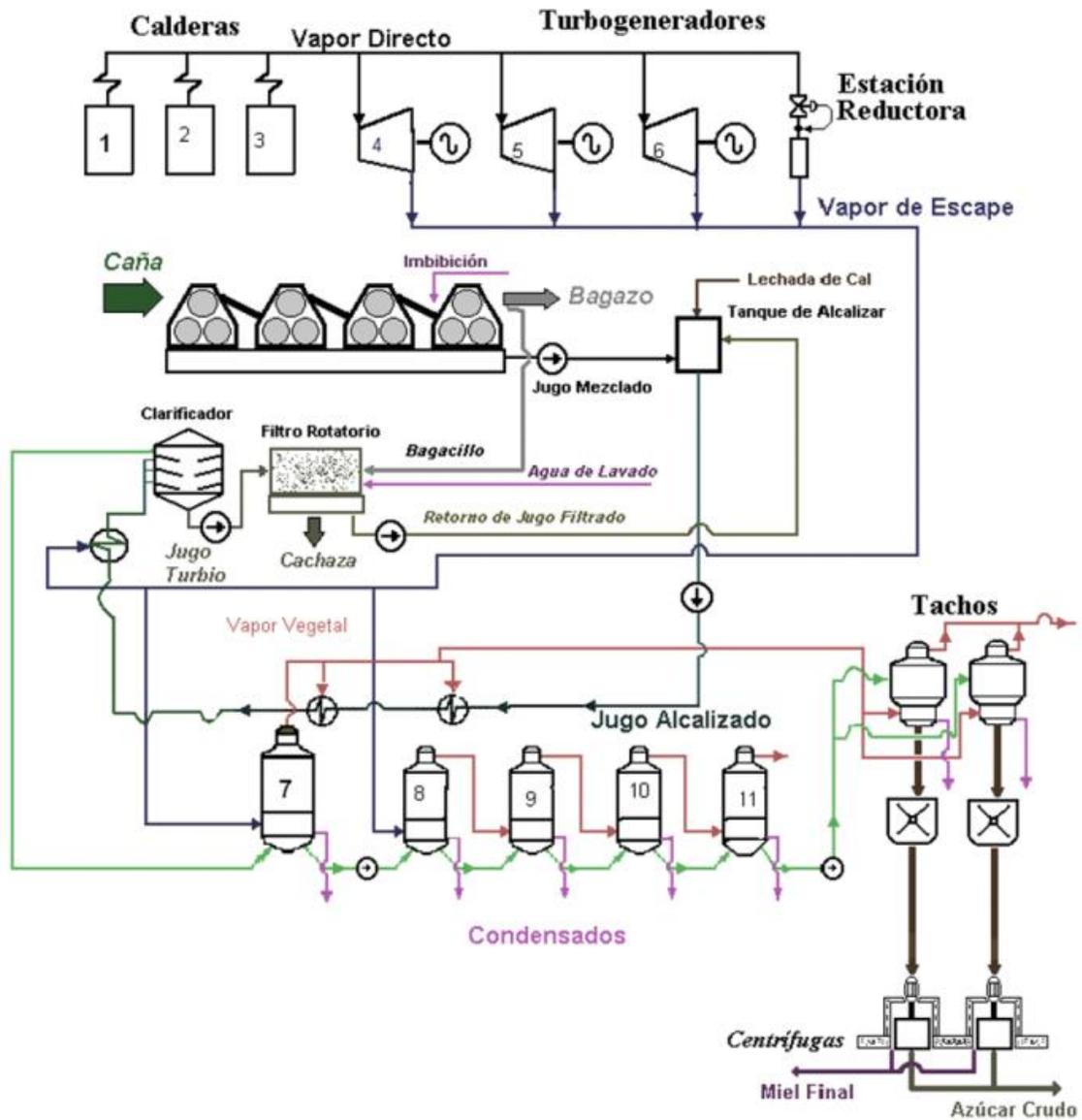
31. Muñoz, B. (1992). La Metodología de la Seguridad Industrial, Ministerio de Ciencia y Tecnología.
32. Nolan, D.P. (2011). Handbook of Fire and Explosion Protection Engineering Principles for Oil, Gas, Chemical and Related Facilities. Gulf Professional Publishing is an imprint of Elsevier. Second edition. The Boulevard, Langford Lane, Kidlington, Oxford OX5 1GB, UK.
33. Orozco J. L. (2009) Introducción al Análisis de Riesgos. Departamento de Química e Ingeniería Química. UMCC. Cuba
34. Pedrosa. R. (1975) Fabricación de Azúcar Crudo de Caña. Ed. Científico Técnica, La Habana,
35. PNUMA/IPCS. (1999). Evaluación de Riesgos Químicos. Programa Nacional de la Naciones Unidas para el Medio Ambiente.
36. Poujaud, D. (2017). *Estimación de riesgos por incendio y explosión en la sección de hidrofinación de diésel de una refinería de petróleo.* (Tesis de pregrado). Universidad de Matanzas, Cuba.
37. Ramos, A. (1987). Procedimiento para el Análisis de Riesgos de Operación. Método HAZOP. Comisión Autónoma de Seguridad e Higiene en el Trabajo de Industrias Químicas y Afines, Madrid.
38. Rodríguez, E., Calzadilla, L., Ruíz, L., y Basulto, E. (2015). Evaluación de los Riesgos del Proceso Tecnológico en la Planta de procesamiento de crudo perteneciente a la UEB de Producción del epep-centro (Proyecto de Curso). Universidad de Matanzas, Cuba.
39. Rosabal Vega, J. (2017). Hidrodinámica y separaciones Mecánicas Tomo II Ediciones ENPES San Miguel no. 111 Vedado, La Habana, Cuba
40. Ruiz, A. R. (1952). Procedimiento para Mojar más el Bagazo de la Caña de Azúcar. Solicitud de Registro de Patente No. 140 809.

Referencias Bibliográficas

41. San Martín Hernández, Alejandro. (2020). *Establecimiento de condiciones de imbibición para un mejor comportamiento de la etapa de extracción del proceso de producción de azúcar crudo* (Tesis de pregrado). Universidad de Matanzas, Cuba.
42. Sidaoui, P. (2022). 5 grandes riesgos a tener en cuenta en la industria azucarera. Agroalimentaria.
43. (SPC) Servicio de Protección Civil, (2002) Procedimiento de evaluación de riesgos tecnológicos en el entorno. Barcelona-España
44. Vílchez, J. e. a. (1995). Lessons Learnt from emergencias alter accidentes in Portugal and Spain involving dangerous chemical substances. Office for Official Publications of the European Community.
45. Van der Poel, P. W.; Schiweck, H.; Schwartz, T. (1998). *Sugar Technology beet and cane manufacture. Published whit support of the beet sugar development foundation, Denver, USA*
46. Wells, Geoff. (2003). Majors Hazards and their management. Gulf Publishing Company. Houston, Texas.
47. Zossi, B. S., Navarro M. E., Sorol, N., Sastre, M. y Ruiz, R. M. (2008). Validación de una metodología para determinar el contenido de almidón en azúcar. Revista industrial y agrícola de Tucumán, 85 (2). ISSN 1851-3018.

Anexos

Anexo 1. Diagrama del proceso objeto de estudio.



Anexo 2. Determinación espectrofotométrica de almidón en jugos (MACU, 2008).

En un beaker de 100 mL, se agregan 20 g del jugo y se adicionan 80 mL de etanol y 2 g de tierras infusorias activada. Se agita, se deja en reposo por 15 min y se filtra a presión reducida. El precipitado obtenido se trasvasa a un beaker de 200 mL y se le adiciona 40 mL de disolución cloruro de calcio-ácido acético (la disolución de cloruro de calcio se prepara a una concentración de 40 % m/m y se ajusta su pH a 3 con solución de ácido acético 0,033 mol/L) se cubre con un vidrio reloj y se mantiene a ebullición suave durante 15 min. Se enfría la solución y se enraza a un volumen de 100 mL. Se homogeniza, se filtra, se desechan los primeros 10 mL. Se toma 20 mL del filtrado y se adicionan: 2,5 mL de solución de ácido acético 2 mol/L, 0,5 mL de yoduro de potasio 10 % (m/v) (solución que se debe preparar inmediatamente antes de utilizar) y 5 mL de yodato de potasio 0,00167 mol/L. Se enraza a un volumen de 50 mL y se determina la absorbancia a 600 nm en una celda de 1 cm. Para la preparación del blanco se adicionan 8 mL de la disolución cloruro de calcio-ácido acético y los mismos volúmenes de la solución de ácido acético, yoduro de potasio, yodato de potasio, enunciadas anteriormente y se enraza a un volumen de 50 mL con agua destilada.

Para preparar la tierra de infusorios activada se pesan 50 g de tierra de infusorios, se añade aprox. 1 000 mL de agua y 50 mL (ó 59,0 g) de ácido clorhídrico (d₂₀=1,18 g/ml), se agita 5 min, se filtra mediante vacío y se lava con agua hasta que el filtrado adquiera el pH del agua utilizada. Seque la tierra infusoria activada a temperatura ambiente.

Curvas de calibración para determinar almidón en jugo

Mida alícuotas de una solución de referencia de almidón de 0,8 g/L, de 0,0, 1,0, 2,0, 3,0, 4,0 y 5,0 mL y deposítelas en matraces de 50 mL. Adicione a cada matraz, agua destilada hasta aproximadamente 20 mL, 2,5 ml de solución de ácido acético (2 mol/L), 0,5 mL de solución de yoduro de potasio (10 % m/v) solución que se debe preparar inmediatamente antes de utilizar) y 5,0 mL de solución de yodato de potasio (0,00167 mol/L). Enrase con agua destilada y mida la absorbancia a 600 nm en una celda de 1 cm, utilice como blanco la solución que

no contiene almidón. Estos puntos equivalen a 0,0, 0,8, 1,6, 2,4, 3,2 y 4.0 mg de almidón por cada 50 mL de solución.

Una vez trazada la curva, con la absorbancia de la muestra y la misma se puede determinar la concentración de almidón de la muestra. Para el caso de la determinación de almidón en jugo, se calcula el contenido de almidón, mediante la ecuación A.1:

$$CA = \frac{1000 * m}{m_j * Bx} \quad \text{Ec. A.1}$$

Donde, CA: concentración de almidón (mg/kg); m: es la masa, en mg, de almidón obtenido a través de la curva de referencia; Bx; sólidos disueltos, en % m/m, presentes en la masa (mi) de jugo original; mj: masa, en g, contenida en los 50 mL de solución a la que se le desarrolla color.

Para determinar la masa de la muestra a la que se le desarrolla color se utiliza la ecuación A.2:

$$m_j = \frac{m_i * V_A}{100} \quad \text{Ec. A.2}$$

Siendo VA: Volumen que se toma de la muestra una vez filtrada (mL).

Anexo 3. Determinación del Brix del jugo.

Se toma una porción del jugo, se filtra y se lee la temperatura con un termómetro. Se procede al cálculo mediante la siguiente expresión:

$$SAD = L + C_T \quad \text{Ec. A.3}$$

Donde: L, es la lectura, en °Bx, a la temperatura de medición; y C_T , es la corrección por efecto de la temperatura, en °Bx, cuando ésta difiere de 20° C.

Anexo 4. Determinación de Pol en jugo.

Homogeneice la muestra de jugo y pese, en la cápsula, 26.00±0.01g, trasváselos cuantitativamente al matraz 100 ml, añada agua hasta aprox. 80 ml y 2.0 ml de la solución de la sal de aluminio, mezcle mediante rotación y adicione el volumen de solución de hidróxido de sodio. Enrase hasta el aforo y agite con vigor, filtre, a través de papel alrededor de 50 ml y determine la lectura sacarimétrica.

Anexo 5. Determinación de insolubles.

Tome aprox. 200 ml del jugo; pese el beaker con la porción de ensayo adiciónale aprox. 6.0±0.1 g de tierra de infusorios y caliente hasta aprox. 90° C. Coloque el papel de filtro, seco y tarado hasta ±0.1 g, en el embudo Büchner previamente ajustado al Kitasato, humedézcalo con agua y disminuya la presión para que se adhiera a la placa filtrante. Con el sistema a presión atmosférica y auxiliándose del agitador trasvase cuantitativamente el contenido del jarro al embudo y haga vacío. Lave el residuo con al menos 200 ml de agua. Mantenga el vacío hasta que el papel se seque y pueda separarse del Büchner con facilidad. Extraiga cuidadosamente el papel con los insolubles, dóblelo con precaución y séquelo a 105±5° C durante 3 h. Transcurrido este tiempo, colóquelo en la desecadora para que alcance la temperatura ambiental (aprox. 15 min) y péselo hasta ±0.1 g. El contenido de insolubles en la muestra (I), en % m/m, se calcula mediante:

$$I = 100 * \frac{(m_3 - m_2 - m_1)}{m} \quad \text{Ec. A.4}$$

Donde: m_1 , es la masa, en g, del papel seco; m_2 , es la masa, en g, de la tierra de infusorios seca; m_3 , es la masa, en g, del papel con la tierra y los insolubles; y m , es la masa, en g, de la muestra.

Anexo 6. Determinación de reductores mediante el método del ácido 3,5-dinitrosalicílico (DNSA) (Benfeld, 1955).

Se toma 1 mL del jugo industrial, luego se añade 1 mL del DNSA y se incuba durante 10 min en baño de María a 100 °C. Se añade 1,2 mL de agua destilada, se enfría y se mide la absorbancia a 546 nm. En función de estas absorbancias se determina la correspondiente concentración de glucosa a partir de la siguiente ecuación: $y=0,3363*x-0.05111$ ($\mu\text{mol/mL}$).

Anexo 7. Parámetros medidos durante días de realizado el estudio.

Parámetros	Replicas					
	1	2	3	4	5	6
Temperatura de agua de imbibición (°C)	59.6	59.8	59.5	53.8	75	66.36
Temperatura de agua de lavado del filtro (°C)	79	80.3	80	79	80.2	79
Temperatura total de los calentadores (°C)	106	98	102	103	104	107.1
Bx meladura	64.04	63.13	63.97	63.67	62.46	63.47
Recobrado	79.276	81.63	77.802	76.862	79.047	74.696
Rendimiento	8.834	8.6	8.431	10.1	8.453	8.624
Pérdidas en bagazo	9.124	7.459	7.642	6.608	7.444	12.663
Pérdidas en cachaza	1.245	0.859	1.256	1.302	1.453	0.909
Pérdidas en miel	8.993	8.829	9.007	12.33	11.039	9.963
Pérdidas en indeterminados	1.362	1.222	4.293	2.899	1.967	1.776
Almidón en azúcar (ppm)	260	260	260	260	328	
Insolubles en jugo filtrado	–	0.8585	0.1291	0.2343	1.2067	1.2104
Humedad en la cachaza	–	69.4615	67.7307	71.0769	68.5769	71.8076
Contenido de almidón en Jugo Mezclado	690.94	603.06	671.09	631.23	608.85	640.45
Contenido de almidón en Jugo Clarificado	101.93	124.53	104.88	115.48	107.32	110.53
Contenido de almidón en Meladura	100.53	105.09	97.05	110.89	102.39	99.06

Anexo 8. Determinación del grado de incidencia (O) y severidad (S) en las variables.

Parámetros	Incidencia (O)	Severidad (S)									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Temperatura de evaporación del agua de imbibición (°C)	7	65-80	<u>60-65</u>	55-60	80-85	50-55	45-50	40-45	35-40	85-90	90-95
Pérdidas en bagazo (%)	10	0-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-8	<u>8-10</u>	10-12	12-13	13-14
Contenido de almidón en Jugo Mezclado (mg/L)	10	100-300	300-450	450-500	500-550	550-600	<u>600-700</u>	700-800	800-900	900-1000	1000-1100
Temperatura de agua de lavado del filtro (°C)	10	45-50	50-55	55-60	60-65	65-70	70-75	<u>75-80</u>	80-85	85-90	90-95

Referencias Bibliográficas

Insolubles en jugo filtrado	4	1.2-1.3	1.1-1.2	1.0-1.1	0.9-1.0	0.8-0.9	<u>0.7-0.8</u>	0.6-0.7	0.5-0.6	0.4-0.3	0.3-0
Temperatura total de los calentadores (°C))	2	110-105	<u>105-102</u>	102-101	101-100	100-98	98-96	96-94	94-92	92-90	90-50
Pérdidas en cachaza (%)	1	0-0.5	0.5-1	<u>1-1.5</u>	1.5-2	2-2.5	2.5-3	3-3.5	3.5-4	4-4.5	4.5-5
Humedad en la cachaza (%)	10	75-80	70-75	<u>65-70</u>	60-65	55-60	55-30	80-85	85-90	90-95	95-100
Contenido de almidón en Jugo Clarificado (mg/L)	1	0-50	50-100	<u>100-150</u>	150-200	200-250	250-300	300-350	350-400	400-450	450-500
Brix meladura	1	<u>60-64</u>	64-68	68-72	72-76	58-60	56-58	54-56	52-54	50-52	50-20
Contenido de almidón en	1	0-50	50-100	<u>100-150</u>	150-200	200-250	250-300	300-350	350-400	400-450	450-500

Referencias Bibliográficas

Meladura (mg/L)											
Pérdidas en miel	10	0-2	2-4	4-6	6-8	8-10	<u>10-11</u>	11-12	12-13	13-14	14-15
Pérdidas en indeterminados (%)	8	0-1	1-2	<u>2-3</u>	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10
Recobrado (%)	8	100-90	90-80	<u>80-75</u>	75-70	70-65	65-60	60-55	55-50	50-45	45-40
Rendimiento (%)	8	12-11	11-10	10-9	<u>9-8</u>	8-7	7-6	6-5	5-4	4-3	3-1
Contenido de almidón en azúcar crudo (mg/L)	10	0-100	100-250	<u>250-300</u>	300-325	325-350	350-375	375-400	400-425	425-450	450-500

Anexo 9. Resultados de aplicación del FMEA en el área de extracción.

Descripción del área	Elemento	Modo de fallo	Forma de detección del fallo	Efecto de fallo	(O)	(D)	(S)	NPR	Acciones correctivas
Extracción	Temperatura de evaporación del agua de imbibición (°C)	Temperatura de imbibición fuera del intervalo de 65 a 80°C.	Deficiente proceso de extracción de sacarosa en el tándem de molinos. Molida de caña en su periodo de crecimiento. Elevada presencia de materiales no portadores de sacarosa. Mala preparación de la caña.	Valores de Pol en el residuo leñoso superiores al 2%. Formación de ceras en los molinos. Presencia de microorganismos destructores de sacarosa y formadores de sustancias extrañas que	7	1	2	14	<p>Limpieza y mantenimiento de los calentadores que proporcionan el condensado para el proceso de imbibición.</p> <p>Control microbiológico adecuado, con la higienización periódica del tándem de molinos.</p> <p>Control riguroso de la temperatura del agua de imbibición. Revisión y mantenimiento de los equipos de preparación de la caña.</p>

Referencias Bibliográficas

				interfieren en el proceso.					
	Pérdidas en bagazo	Valores de Pol en bagazo superiores al 1.90 %.	Elevado contenido de fibra en el material leñoso. Mala preparación de la caña. Bajas presiones en los molinos. Temperatura y flujo de agua de imbibición inadecuadas para la extracción de la sacarosa. Deficiente proceso de extracción en los molinos.	Pérdidas de sacarosa en residuo leñoso superiores a la norma. Reducción del rendimiento industrial.	10	10	7	700	Limpieza y mantenimiento del tándem de molinos. Control riguroso de la temperatura de imbibición y de la relación entre el peso del agua de imbibición y el peso de fibra en caña. Revisión y mantenimiento de los equipos de preparación de la caña.

Referencias Bibliográficas

	Contenido de almidón en Jugo Mezclado	El almidón no se genera durante el proceso de producción, depende de las características y variedad de la materia prima.	Procesamiento de materias extrañas (hojas y cogollos), que representa la mayor fuerte de entrada de almidón al proceso. Molienda de cañas inmadura.	Aumento de la viscosidad de los jugos. Demora e inhibe la cristalización. Impide el agotamiento de las mieles y dificulta la purga en las centrífugas. provocar pérdidas de sacarosa por modificaciones en el crecimiento del cristal.	10	10	6	600	Selección de las variedades de caña sobre la base del contenido de almidón. Utilización de métodos físicos de separación como la ultrafiltración u ósmosis inversa. Extracción mecánica del almidón insoluble, clarificación al vacío y la centrifugación del jugo. Uso de la enzima α -amilasa para hidrolizar el almidón.

				<p>Tiene la tendencia de ocluirse en el cristal de azúcar crudo.</p> <p>Disminuye la eficiencia de la cristalización, ya que se adhiere a las paredes de los tachos aumentando el tiempo de cocimiento de las masas. Las altas viscosidades provocan el</p>					
--	--	--	--	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--	--	--	--	--

				incremento de los costos energéticos al disminuir la transferencia de calor en los evaporadores, cristalizadores y tachos.					
--	--	--	--	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--	--	--	--	--

Anexo 10. Resultados de aplicación del FMEA en el área de purificación.

Descripción del área	Elemento	Modo de fallo	Forma de detección del fallo	Efecto de fallo	(O)	(D)	(S)	NPR	Acciones Correctivas
Purificación	Temperatura de agua de lavado del filtro (°C)	Temperaturas por encima de 60°C	Deficiente proceso de filtración.	Extracción de ceras y almidones de la cachaza, que afectan la filtrabilidad de	10	1	7	70	Aplicar mantenimiento general en los filtros. Control riguroso de la temperatura del agua de lavado.

Referencias Bibliográficas

				la torta. Valores de Pol en cachaza superiores al 3.5 %.					
	Insolubles en jugo filtrado (%)	Contenido de insolubles similar o inferior al del jugo alcalizado o mezclado.	Deficiente proceso de filtración y clarificación. Mal acondicionamiento del jugo mezclado, por incorrecta adición de floculante y lechada de cal. Inadecuada temperatura de agua de lavado, presión de vacío y velocidad de	Pérdidas de sacarosa en cachaza. Reducción del rendimiento industrial.	4	10	6	240	Limpieza manual o química y mantenimiento de los equipos involucrados. Control de la dosificación de floculante y lechada de cal. Control riguroso de los parámetros operacionales de los equipos involucrados.

Referencias Bibliográficas

			rotación de los filtros, así como la presencia de un exceso de bagacillo.						
	Temperatura total de los calentadores (°C)	Temperaturas inferiores a 102 °C a la salida de los calentadores.	Poca presión en el vapor de escape de la línea en general. Presencia de incrustaciones en los calentadores, que pueden ser ocasionadas en parte por el almidón. Deficiente generación de vapor en los equipos que tienen extracción a los calentadores. Deficiente extracción de gases	La variación de la temperatura en los calentadores provoca diferentes densidades y corrientes convectivas que afectan el proceso y originan una sedimentación defectuosa. No se	2	1	2	4	<p>Limpieza manual o química y mantenimiento de los equipos involucrados.</p> <p>Reajuste de la válvula reductora para mantener la presión deseada en la línea de escape.</p> <p>Si existe poca generación de vapor, debe tenerse en cuenta el balance energético de la planta, y en función de este tomar las medidas pertinentes.</p>

Referencias Bibliográficas

			<p>incondensables y de condensados.</p>	<p>favorecen las reacciones del ácido fosfórico y el hidróxido de sodio, afectándose la posterior sedimentación de impurezas durante la clarificación.</p> <p>Aumento de la viscosidad y densidad de la materia ordinaria en suspensión.</p>					
	<p>Pérdidas en cachaza (%)</p>	<p>Valores de Pol en cachaza</p>	<p>Deficiente proceso de extracción de sacarosa en la filtración.</p>	<p>Pérdidas de sacarosa en cachaza.</p>	<p>1</p>	<p>10</p>	<p>3</p>	<p>30</p>	<p>Control riguroso de la temperatura del agua de lavado, la presión de vacío y la</p>

Referencias Bibliográficas

		superiores al 2 %.	<p>Temperatura de agua de lavado de los filtros superiores a 60 °C.</p> <p>Inadecuada presión de vacío y velocidad de rotación en los filtros.</p> <p>Inadecuada adición de bagacillo a los lodos.</p> <p>Mal lavado de la torta.</p>	Reducción del rendimiento industrial.					<p>velocidad de rotación de los filtros.</p> <p>Limpieza y mantenimiento de los filtros.</p> <p>Verificar funcionamiento de las bombas de vacío, en caso necesario dar mantenimiento.</p>
	Humedad en la cachaza (%)	Valores de humedad en cachaza fuera del rango de 75 a 80%.	<p>Inadecuada presión de vacío y velocidad de rotación en los filtros.</p> <p>Existencia de una relación de cantidad de agua de lavado y cantidad de torta superior al 150 %.</p>	En la práctica suele decirse que una humedad alta en la cachaza, corresponde a una Pol alta y viceversa.	10	1	3	30	<p>Extremado control de la presión de vacío y la velocidad de rotación de los filtros.</p> <p>Chequear periódicamente la cantidad de agua de lavado necesaria aplicada en los filtros</p>

Referencias Bibliográficas

	Contenido de almidón en Jugo Clarificado (ppm)	Reducción de contenido de almidón durante la clarificación inferior 50 %.	Deficiente proceso de filtración y clarificación. Mal acondicionamiento del jugo mezclado, por incorrecta adición de floculante y lechada de cal. Inadecuada temperatura de agua de lavado, presión de vacío y velocidad de rotación de los filtros, así como la presencia de un exceso de	Demora e inhibe la cristalización. Impide el agotamiento de las mieles y dificulta la purga en las centrífugas. Provoca pérdidas de sacarosa por modificaciones en el crecimiento del cristal. Tiene la	1	10	3	30	Selección de las variedades de caña sobre la base del contenido de almidón. Utilización de métodos físicos de separación como la ultrafiltración u ósmosis inversa. Extracción mecánica del almidón insoluble, clarificación al vacío y la centrifugación del jugo. Uso de la enzima α -amilasa para hidrolizar el almidón.

			bagacillo.	tendencia de ocluirse en el cristal de azúcar crudo. Disminuye la eficiencia de la cristalización, ya que se adhiere a las paredes de los tachos aumentando el tiempo de cocimiento de las masas. Las altas viscosidades provocan el incremento de los costos					
--	--	--	------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--	--	--	--	--

				energéticos al disminuir la transferencia de calor los cristalizadores y tachos.					
--	--	--	--	----------------------------------------------------------------------------------	--	--	--	--	--

Anexo 11. Resultados de aplicación del FMEA en el área de cristalización.

Descripción del área	Elemento	Modo de fallo	Forma de detección del fallo	Efecto de fallo	(O)	(D)	(S)	NPR	Acciones Correctivas
Cristalización	Brix meladura	Brix fuera del intervalo de 60 a 68 °Bx	Deficiente proceso de evaporación o concentración. Poca presión en el vapor de escape de la línea en	Aumento en el consumo de vapor en los tachos. A menor Brix mayor tiempo a emplear en los tachos para	1	1	1	1	Limpieza manual o química los evaporadores Aplicar mantenimiento a los equipos y tuberías involucrados. Control eficaz en la presión de vapor de escape.

Referencias Bibliográficas

			<p>general.</p> <p>Alta humedad en el residuo leñoso.</p> <p>Presencia de incrustaciones en tuberías y equipos.</p>	<p>completar la templa</p>					
	<p>Contenido de almidón en Meladura (ppm)</p>	<p>Si la cantidad de almidón que pasa a la meladura es mayor de 150 ppm comienzan a existir afectaciones</p>	<p>Deficiente proceso de clarificación.</p>	<p>Demora e inhibe la cristalización.</p> <p>Impide el agotamiento de las mieles y dificulta la purga en las centrífugas.</p> <p>Provoca</p>	1	10	3	30	<p>Selección de las variedades de caña sobre la base del contenido de almidón. Utilización de métodos físicos de separación como la ultrafiltración u ósmosis inversa. Extracción mecánica del almidón insoluble, clarificación al vacío y la centrifugación del jugo. Uso de la enzima α-amilasa para hidrolizar el almidón.</p>

		<p>en el proceso (Penados, 2004).</p>		<p>pérdidas de sacarosa por modificaciones en el crecimiento del cristal. Tiene la tendencia de ocluirse en el cristal de azúcar crudo.</p> <p>Disminuye la eficiencia de la cristalización, ya que se adhiere a las paredes de los tachos aumentando el tiempo de</p>					
--	--	---------------------------------------	--	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--	--	--	--	--

Referencias Bibliográficas

				cocimiento de las masas. Las altas viscosidades provocan el incremento de los costos energéticos al disminuir la transferencia de calor los cristalizadores y tachos.					
	Pérdidas en miel	Valores de superiores a 5 %	Deficiente agotamiento de mieles. Poca presión en el vapor de escape de la línea en	Pérdidas de sacarosa en miel. Reducción del rendimiento industrial.	10	10	6	600	Control eficaz en la presión de vapor de escape. Aplicar limpieza y mantenimiento en los tachos. Control de la temperatura de operación

Referencias Bibliográficas

			general. Alta humedad en el residuo leñoso.						
	Pérdidas en indeterminados	Aumento excesivo de las pérdidas	Inversión de la sacarosa, indisciplinas tecnológicas por parte de los operadores, paradas de la planta no planificadas, entre otras.	Reducción del rendimiento industrial.	8	10	3	240	Aplicar periódicamente mantenimiento general en la planta. Control de la dosificación de floculante y lechada de cal. Cursos de capacitación a los operarios
	Recobrado	Valores inferioral 80	Pérdidas de sacarosa en cachaza, en	Reducción de la cantidad de sacarosa que	8	10	3	240	Control riguroso de la temperatura en todo el proceso

Referencias Bibliográficas

		%.	bagazo, en miel final, unido a las pérdidas indeterminadas	se recupera como azúcar					Limpieza y desinfección de los equipos involucrados en el proceso
	Rendimiento	Valor inferior al 10 %.	Errores en el proceso Molida inestable Ineficiencia en la etapa de extracción del jugo	Pérdidas de toneladas de azúcar producidas.	8	10	4	320	Cursos de capacitación a los operarios para evitar errores en el proceso Aplicar correcto mantenimiento a los equipos involucrados

Anexo 12. Resultados de aplicación del FMEA en el producto final.

Descripción del área	Elemento	Modo de fallo	Forma de detección del fallo	Efecto de fallo	(O)	(D)	(S)	NPR	Acciones Correctivas
Producto final	Almidón en azúcar (ppm)	Contenido de almidón superior a 250 ppm	Determinación del contenido de almidón en el producto final.	Afectan el proceso de refinación del azúcar.	10	10	3	300	Selección de las variedades de caña sobre la base del contenido de almidón. Utilización de métodos físicos de separación como la ultrafiltración u ósmosis inversa. Extracción mecánica del almidón insoluble, clarificación al vacío y la centrifugación del jugo. Uso de la enzima α -amilasa para hidrolizar el almidón.

Referencias Bibliográficas

Anexo 13. Resultado de la velocidad de sedimentación.

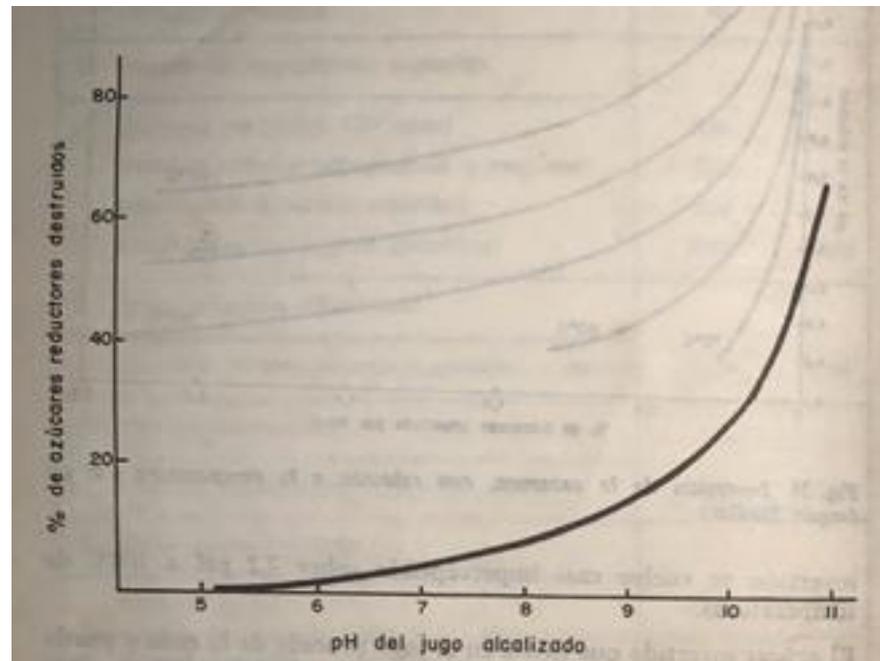
Tiempo(min)	26/3/2022	27/3/2022	28/3/2022
	Sedimento (cm)		
0	29.6	29.6	29.6
1	16.6	9.6	8.6
2	14.6	8.9	7.6
3	13.1	9.1	6.9
4	12.6	9.1	6.5
5	12.1	8.6	6.1
6	11.6	8.1	6
7	11.1	7.9	5.9
8	10.8	7.8	5.8
9	10.6	7.6	5.6
10	10.4	7.6	5.6
11	10.2	7.5	5.5

Referencias Bibliográficas

12	10.1	7.5	5.5
13	10	7.5	5.5
14	9.9	7.4	5.4
15	9.8	7.4	5.4
16	9.7	7.4	5.4
17	9.6	7.4	5.4
18	9.6	7.3	5.3
19	9.6	7.3	5.3
20	9.6	7.3	5.3
21	9.6	7.2	5.3
22	9.3	7.2	5.3
23	9.3	7.2	5.2
24	9.2	7.1	5.1
25	9.2	7.1	5.1
26	9.1	7.1	5.1

27	9.1	7.1	5.1
28	9.1	7.1	5.1
29	9.1	7.1	5.1

Anexo14. % de destrucción de azúcares reductores.



Fuente: Honing (1979)