

Universidad de Matanzas
Facultad de Ciencias Técnicas
Departamento de Química e Ingeniería Química



**Evaluación del contenido de almidón durante el
proceso de producción del azúcar crudo.**

**Trabajo de diploma en opción del título:
Ingeniero Químico.**

Autor:

Dina Esther Rodríguez Pino

Tutores:

Ing. Adielis Jiménez Cárdenas

Dr.C. Héctor L. Ramírez Pérez

Consultante:

Dr.C: Jesús D Luis Orozco

Matanzas, Cuba 2018

Pensamiento

“La inteligencia consiste no solo en el conocimiento, sino también en la destreza de aplicar los conocimientos a la práctica”.

Aristóteles

Nota de aceptación

Presidente del Tribunal

Firma

Miembro del Tribunal

Firma

Miembro del Tribunal

Firma

Miembro del Tribunal

Firma

Declaración de autoridad

Mediante el presente documento , me declaro como única autora de este trabajo de tesis como requisito parcial para optar por el título de Ingeniero Químico, el cual se realizó en la Universidad de Matanzas “Camilo Cienfuegos”, y autorizo que el mismo sea utilizado por dicha institución como material de consulta.

Firma

Dedicatoria

Primeramente a Dios por guiar mi camino, a mi mamá, mis abuelos y mi hermana por darme todo su amor, apoyo y ser incondicionales durante toda mi vida principalmente en el transcurso de mi carrera. Al resto de mi familia, mi novio y mis amigos por creer en mí y darme ánimos para continuar en momentos difíciles.

Agradecimientos

- A Dios por ser mi guía y cuidarme en todo momento.
- A mi mamá por luchar incansablemente a mi lado en cada una de las batallas que se presentaron a lo largo de mi carrera.
- A mis abuelos y mi hermana por apoyarme a en el transcurso de mi carrera y durante la realización de esta tesis.
- A mi novio Alejandro Contreras por ser mi calma y mi rayito de luz en cada tempestad, y ayudarme a la realización de esta tesis.
- A mis amigos por darme ánimo en todo momento.
- A mis tutores Adielis Jiménez y Héctor L. Ramírez Pérez por dedicar su tiempo y brindarme sus conocimientos en la realización de la tesis.
- Al Grupo Empresarial AZCUBA por permitirme realizar los experimentos y brindarme apoyo para realizar este trabajo.
- Al personal que trabaja en el laboratorio del Central, principalmente David por su ayuda para la realización de los experimentos.
- A todos los trabajadores del Central y principalmente a Yuniesqui, que de una manera u otra me brindaron su mano.
- A los profesores Santiago y Javier de la carrera que han contribuido de cierta manera a la realización de este trabajo y por ser excelentes educadores.

Muchas Gracias

Resumen:

En esta investigación se evalúa el contenido de polisacáridos, específicamente de almidón en las diferentes corrientes del proceso de producción de azúcar en el central Mario Muñoz, para lo cual se emplean técnicas analíticas por el método espectrofotométrico. Se realiza un análisis de los resultados experimentales, donde se determina cómo influye cada una de las etapas del proceso en los mismos. A través de las curvas de calibración de las técnicas analíticas, se ejecuta la validación de las mismas, para comprobar que se obtengan errores aceptables e inferiores al 5%. Se comprueba mediante cálculos que el porcentaje de remoción de almidón en el proceso de clarificación no corresponde con la bibliografía que se consulta, ya que reporta resultados alrededor del 2-18% de remoción. También se examina la influencia del contenido de almidón en el consumo de vapor. Para finalizar se plasma una valoración económica con el objetivo de comprobar la existencia de posibilidades penales impuestas por incumplimiento de las normas de calidad.

Summary:

In the present investigation the behavior of the starch is evaluated in the process of production of raw sugar of the sugar power station Mario Muñoz Monroy, for that which the content of starch is determined in the different currents of the process by means of the developed of technical analytic, for the method espectrophotometric. It is realize an analysis of the experimental results to determine the influence of the stages in the same ones by means. Once the curves of calibration of the analytic techniques are developed, it is carried out the validation of the same ones and it is proven that acceptable errors are reached, inferior to 5%. The percentage of removal of starch is determined and it's not in the clarification process that is around 2-18%. The influence of the content of starch is analyzed in the consumption of vapor. It is realize an economic valuation in which is determined that possibility of penalties imposed by nonfulfillment of the norms of quality does not exist.

Tabla de contenidos

Contenidos	Página
Introducción	1
Capítulo 1. Análisis Bibliográfico.	4
1.1. Principales etapas del proceso de producción de azúcar crudo	4
1.1.1. La calidad en el proceso de producción de azúcar crudo	9
1.2. Características y propiedades del almidón	10
1.2.1. Estructura química del almidón	10
1.2.2. Gelatinización y otras propiedades del almidón	11
1.2.3. Efecto de enzimas sobre el almidón	12
1.2.4. Algunas reacciones del almidón	13
1.3. Influencia del almidón en el proceso de producción de azúcar crudo	13
1.4. Métodos de medición del almidón en el proceso	15
1.5. Métodos de control y eliminación del almidón en la industria azucarera	17
1.6. Determinación y estudio del comportamiento del almidón	20
1.7. Conclusiones parciales	21
Capítulo 2. Materiales y métodos	22
2.1 Descripción del caso de estudio	22
2.1.1. Descripción general del proceso objeto de estudio	22
2.1.2. Definición de las etapas del proceso de producción de azúcar crudo	22
2.2 Determinación del comportamiento del contenido de almidón en el proceso de producción de azúcar crudo	26
2.2.1 Selección de las corrientes de muestreo	27
2.2.2. Determinación analítica del contenido de almidón	28
2.2.3. Determinación de las curvas de calibración para determinar almidón en jugo y azúcar crudo	31
2.2.4. Procedimiento para la validación de las curvas de calibración	32
2.3. Procedimiento para analizar el comportamiento del almidón en el proceso de producción de azúcar crudo	34
2.3.1 Comportamiento en la etapa de extracción y molienda	34

2.3.2. Comportamiento en la etapa de purificación	34
2.3.2.1. Determinación del porcentaje de remoción de almidón en la etapa de clarificación	34
2.3.3. Comportamiento en las etapas de evaporación-cristalización	35
2.3.3.1. Determinación del porcentaje de retención de almidón en azúcar crudo	35
2.4. Determinación del efecto del almidón en el consumo de vapor del proceso	36
2.4.1. Metodología para determinar el consumo de vapor en el proceso	36
2.4.1.1 Balances de masa en el proceso	37
2.4.1.2 Balances de energía en el proceso	44
2.5. Valoración económica.	48
2.5.1. Normas de calidad del azúcar.	48
2.6. Conclusiones Parciales.	49
Capítulo 3. Análisis de resultados.	50
3.1. Curvas de referencia para obtener almidón en el proceso.	50
Validación	
3.1.1. Curvas de referencia para determinar almidón en jugo de caña.	50
3.1.2. Curva de referencia para determinar almidón en azúcar crudo.	51
3.1.3. Análisis de la calidad de ajuste de los modelos de las curvas de referencias.	52
3.2. Análisis del comportamiento del contenido de almidón en el proceso de producción de azúcar crudo.	53
3.2.1 Caracterización estadística de la concentración de almidón en las corrientes del proceso	53
3.2.2 Mapa del contenido de almidón en el proceso	53
3.3 Influencia del contenido de almidón en las etapas del proceso	54
3.3.1 Comportamiento del almidón en la etapa de extracción y molienda	54
3.3.2 Comportamiento del almidón en la etapa de purificación	57
3.3.2.1 Influencia de la etapa de clarificación	60
3.3.3 Comportamiento del almidón en la etapa de evaporación y cristalización	61
3.3.3.1 Determinación del porcentaje de retención de almidón en el	62

azúcar crudo	
3.4 Efecto del almidón en el consumo de vapor del proceso	63
3.4.1 Influencia del almidón en el consumo de vapor durante la etapa de purificación	63
3.4.2 Influencia del almidón en el consumo de vapor durante la etapa de evaporación	65
3.5. Valoración económica.	67
3.6. Conclusiones parciales.	68
Conclusiones	70
Recomendaciones	71
Bibliografía	72
Anexos	

Introducción

A lo largo de la historia, tal y como sucede con muchos de los países de la región caribeña, la industria azucarera es una de las agroindustrias más importantes de nuestro país, proceso que se incrementa en la actualidad dada la integración vertical cada vez más significativa del sector.

Uno de los exponentes más importantes de tal industria en Cuba lo constituye el central azucarero “Mario Muñoz Monroy” el cual se ubica en el municipio de Los Arabos en la provincia de Matanzas y se encuentra en funcionamiento durante la actual zafra que será objeto de estudio del presente trabajo.

La UEB está compuesta por una fábrica de azúcar crudo y una refinería. Constituye uno de los centrales nuevos construidos por la Revolución, tiene como misión principal la producción de azúcar crudo y refino con eficiencia y competitividad; así como sus derivados, tales como: miel final, urea, cachaza, bagazo y la generación de energía eléctrica. El ingenio desde sus inicios cuenta con cuatro plantas principales de producción: Planta Moledora, Planta de Fabricación, Planta de Generación de Vapor y Planta Eléctrica.

En esta industria se lleva a cabo una de las actividades más importantes desde el punto de vista productivo y económico para el país: el procesamiento de la caña de azúcar. Es por ello, que hoy es más evidente la necesidad de realizar investigaciones para conocer más de la naturaleza de la caña de azúcar y el desarrollo de técnicas que hagan más eficiente la extracción de la sacarosa, y ayuden a mejorar los procesos de producción.

Amplias investigaciones se realizan sobre los varios tipos de polisacáridos que se encuentran en la caña de azúcar y sus efectos negativos en el proceso y recobrado de azúcar, pero solo durante el transcurso de la última década la presencia del almidón tomó una importancia relevante para la comercialización del azúcar (Penados 2004).

El azúcar cubano se enfrenta a una reciente crisis de comercialización en el extranjero, es por eso, que se hace necesario que realizar estudios de la presencia de polisacáridos naturales como el almidón, para producir un azúcar que se encuentre entre los parámetros establecidos en lo que a contenido de polisacáridos totales se refiere.

Según Penados (2004) los polisacáridos que se encuentran en el proceso de producción de azúcar incluyen los que son inherentes a la planta de caña, que dependen de la variedad y las condiciones climáticas; y los que resultan por el deterioro en la logística del corte, alce y transporte de la caña de azúcar.

Todos los polisacáridos por razón de sus cualidades físico-químicas tienden a tener un efecto adverso en el proceso de recuperación de sacarosa de la caña de azúcar. Como mínimo, ellos representan una pérdida en términos de azúcar disponible para el proceso y máximo pueden causar demoras por viscosidades excesivas y pérdidas de sacarosa, las cuales se deben a modificaciones en el crecimiento del cristal.

El almidón es un compuesto presente en los jugos de la caña de azúcar que provoca dificultades en las etapas de filtración, clarificación y específicamente cristalización, este ocasiona efectos negativos por el aumento de la viscosidad y adherencia de estos a las paredes de los tachos, lo que aumenta el tiempo de cocimiento de masas y disminuye la eficiencia del proceso. Por estas razones se debe analizar su influencia en el proceso, controlar la cantidad presente y evitar perjudicar la etapa de cristalización con una menor oclusión en el cristal de azúcar.

Al tener en cuenta dichos elementos podemos plantear como **Problema Científico** de esta tesis: ¿Cuál es el contenido e influencia del almidón en las etapas del proceso de producción de azúcar crudo?

Para dar respuesta al problema anterior se propone la siguiente **Hipótesis**: Si se evalúa el contenido de almidón se podrá obtener el comportamiento del mismo en las diferentes etapas del proceso.

Se propone como **Objetivo Principal** para el desarrollo de la investigación:

Evaluar el comportamiento del contenido de almidón durante el proceso de producción de azúcar crudo.

El cumplimiento del objetivo establecido se corrobora con las **Objetivos Específicos**:

- 1) Caracterizar el proceso tecnológico objeto de estudio.
- 2) Seleccionar las etapas y las principales variables de calidad y control del proceso.
- 3) Desarrollar las técnicas de análisis experimental del contenido de almidón que defina el mapa de almidones en el proceso.

- 4) Obtener correlaciones que permitan el control de la calidad y eficiencia del proceso.
- 5) Valorar desde el punto de vista económico el comportamiento del contenido de almidón en el proceso.

Capítulo 1. Análisis bibliográfico

En este capítulo se presentan los referentes teóricos a profundizar en el proceso de producción de azúcar crudo y se abordan algunos aspectos de gran importancia.

Es útil tener en cuenta la descripción del proceso de producción, así como características del almidón, propiedades y su influencia en el proceso de obtención del azúcar crudo, además del uso adecuado de los métodos empleados para la medición, control y eliminación del almidón en la industria azucarera lo que proporciona la determinación y estudio del comportamiento de este polisacárido.

La búsqueda bibliográfica se realiza en bibliotecas científico técnicas, en las diferentes bases de datos disponibles en internet mediante el uso de los buscadores existentes (Google académico, Yahoo, entre otros), en las bases de datos remotas (EBSCO, Sciencedirect, entre otros), y en bibliotecas virtuales de química e ingeniería química.

1.1 Principales etapas del proceso de producción de azúcar crudo

El proceso de producción del azúcar crudo tiene como objetivo extraer el azúcar que trae la caña en forma de cristales lo más pura posible y el mismo se divide en varias etapas (Serafín, 2011).

Etapa 1: Recuperación, preparación y molienda de caña.

Etapa 2: Purificación, calentamiento.

Etapa 3: Evaporación.

Etapa 4: Cristalización y centrifugación.

Etapa 1: Recuperación, preparación y molienda de caña

La caña que proviene del campo se descarga en el basculador desde donde se transporta mediante esteras conductoras hacia los equipos de preparación, estos tienen como objetivo romper la corteza exterior y llagar hasta las celdas donde se encuentra contenida la sacarosa para de esta forma facilitar su extracción (Serafín, 2011).

Según Morales *et al.* (2010), el proceso de extracción del jugo comienza con la preparación de la caña. En esta etapa se busca romper y desgarrar los tallos de la caña con el fin de prepararla para el proceso de molienda. Para ello, usan diferentes tipos de máquinas; entre las que se encuentran: picadoras o cuchillas, desfibradoras o desmenuzadoras. Luego dicha caña se somete al proceso de molienda donde se logra la extracción del jugo de caña mediante la presión que ejercen las mazas o rodillos dentados de cada una de las unidades del tándem de molinos.

Después de preparar la caña, esta se conduce al tren de molinos. Este puede tener cuatro, cinco o seis molinos con cuatro masas. El objetivo de esta etapa es extraer la mayor cantidad posible de azúcar que entra con la caña. El bagazo tiene la característica de no ceder toda el agua que contiene aunque se le apliquen altas presiones. Dada esta característica para lograr una mayor extracción se emplea un sistema de lavado con agua conocido como imbibición: El agua de imbibición se añade en el último molino, la cual debe tener una temperatura entre 60 y 75 °C. En el resto de los molinos; excepto en el primero; lo que ocurre es una maceración que consiste en añadir el jugo extraído de un molino anterior (Serafín, 2011).

Algunos autores difieren en sus criterios con respecto a los parámetros operacionales que garantizan la eficiencia de la etapa de molienda. Entre ellos, Puertas (1983), establece que el valor de la temperatura del agua de imbibición debe encontrarse entre 75 y 80°C, lo cual facilita la extracción y evita el desarrollo microbiano. Sin embargo, Posada (1987), recomienda que la temperatura del agua de imbibición no exceda de los 85°C para evitar que el derretimiento de las ceras de la caña provoque que patinen las mazas de los molinos.

La concentración de sacarosa en jugo (% Pol) y la humedad en el bagazo son dos parámetros que se controlan en la fábrica, pues el primero representa una fuente de pérdida de sacarosa en el proceso y el segundo favorece la eficiencia de la combustión en la caldera. Referido a ello, Hoing (1987) y Hugot (1987) exponen que los valores de la pol en bagazo que sale del último molino deben ser menores de un 3,5%; para así garantizar las menores pérdidas de sacarosa en dicha corriente. Además Carrazana (1975), señala que el porcentaje de humedad en el bagazo tiene que ser menor de un 48%, pues este se convierte

en el primer subproducto del proceso, que se aprovecha como combustible en las calderas.

En el último molino se obtiene jugo mezclado y bagazo, que se quema en las calderas para producir vapor. La planta de vapor cuenta con calderas acuotubulares. El vapor que producen es conocido como vapor directo, el cual es utilizado en los turbogeneradores de la planta eléctrica para generar electricidad. Una vez que sale el vapor de estos equipos se le conoce como vapor de escape de menor contenido calórico, que se usa en calentadores, equipos de evaporación y tachos, los cuales constituyen las necesidades tecnológicas (Serafín, 2011).

Etapas 2: Purificación y calentamiento

En la etapa de molienda se obtiene un jugo de carácter ácido, esto provoca la rápida inversión de la sacarosa, lo cual es una pérdida irreversible en el proceso. Para minimizar las posibles pérdidas de sacarosa el jugo se trata con lechada de cal que se emplea para elevar su pH. La cal también ayuda a precipitar impurezas orgánicas e inorgánicas que vienen en el jugo, que puede ser alcalización en frío, en caliente y fraccionada. Con el propósito de aumentar o acelerar las complejas reacciones químicas, se eleva la temperatura del jugo mediante un sistema de calentadores de tubos y coraza (Serafín, 2011). Clark (1975) alega, que para garantizar estas condiciones la lechada de cal debe tener una concentración de 4°Bé.

Según Pérez *et al.* (2009) la temperatura del jugo alcalizado a la salida de los calentadores debe estar entre 103 y 105°C con el objetivo de favorecer el proceso de coagulación en la etapa de clarificación de tal manera que acelere la velocidad de reacción de los ácidos grasos con el hidróxido de calcio.

Posterior a la etapa de calentamiento, el jugo pasa por el tanque flash, donde se logra una auto-evaporación del agua contenida en el jugo y la estabilización de la temperatura, para evitar que el jugo entre al clarificador a una temperatura superior a la de ebullición y provoque revolturas en el mismo.

Morales *et al.* (2010), plantea que en la etapa de clarificación, se busca eliminar las impurezas solubles e insolubles presentes en el jugo. En la clarificación se separa el jugo en dos porciones, el jugo clarificado y los precipitados sedimentables, espumas y lodos los cuales son el sedimento o precipitado que

contiene sales insolubles, fosfatos de calcio, ceras, gomas y sacarosa en menor cuantía.

Según Herrera (2011), la clarificación del jugo tiene como objetivo producir un precipitado de composición compleja que contiene sales insolubles de cal, albúmina coagulada, ceras, grasas y gomas que contiene el jugo de caña lo que incrementa el color y turbiedad y disminuyen la eficiencia de la extracción de sacarosa.

Una vez que las impurezas son coaguladas, es necesaria la introducción de un proceso que permita que estas sedimenten en el menor tiempo posible para poder producir un jugo claro y proseguir con el proceso de elaboración del azúcar. El proceso que ayuda a la anterior acción es la floculación, la cual puede inducir de diversas formas, pero se usa comúnmente los productos denominados floculantes.

Para recuperar la sacarosa remanente, el precipitado que se forma en la clarificación es sometido a filtración, para lo cual se emplea filtros rotatorios al vacío. En estos equipos se adiciona bagacillo y agua de lavado a la cachaza para facilitar la filtración.

La filtración es una operación a veces delicada y difícil de manejar. Para poder hacerla, con las mejores probabilidades de éxito es necesario observar los siguientes parámetros:

1. Temperatura. Es conveniente filtrar el jugo a alta temperatura pues, la viscosidad del jugo, y, sobre todo, la de las gomas y ceras que debe retener la superficie filtrante, decrece a medida que aumenta la temperatura. En lo posible debe operarse por encima de 80°C.
2. Reacción. Los jugos alcalinos filtran mejor que los jugos ácidos o neutros. Por esta razón generalmente se agrega cal a las cachazas, antes de enviarlas a la filtración. El pH se lleva hasta 8 u 8,5. Es mejor no pasar de 8,5 para no emplear inútilmente un exceso de cal, que también aumenta las incrustaciones en el múltiple efecto.

De la filtración se obtienen nuevamente dos corrientes; un jugo filtrado de calidad intermedia que es recirculado al proceso y se incorpora al tanque de álcalis y un residual al que comúnmente se llama torta o cachaza. La torta es seca y porosa; y contiene, sin embargo, del 75 al 80% de agua (Hugot 1986).

Etapa 3: Evaporación

El objetivo de esta etapa es evaporar la mayor cantidad de agua contenida en el jugo claro de forma tal que se logre su concentración sin llegar a la condición de saturación. Para la evaporación, se requiere de un preevaporador y un cuádruple efecto (Hugot, 1986).

El preevaporador, es el evaporador donde se produce mayor cantidad de vapor vegetal para ser utilizado en otras etapas del proceso. Sin embargo, el cuádruple efecto consta de varios evaporadores. El primer vaso consume vapor de escape y los restantes consumen el vapor vegetal que se produce en la evaporación del vaso que le antecede. Cardona (2009), plantea que el jugo purificado se somete a evaporación en un conjunto de evaporadores en serie, donde puede variar en 4 o 5 unidades. En estas sucesivas evaporaciones, se elimina gran parte del agua contenida en el jugo (alrededor del 80%), de lo cual resulta un material más denso que se conoce como meladura. Según Pérez *et al.* (2009), la meladura a la salida del cuádruple efecto debe tener una concentración próxima a los 65 °Bx.

La concentración de sólidos disueltos (°Brix) a la entrada del primer vaso del área de evaporación es la del jugo claro y en los vasos siguientes los valores del Brix dependen de los de los Brix precedentes (Pérez et al. 2009).

Etapa 4: Cristalización y centrifugación

En la etapa de cristalización la meladura es enviada hacia los tachos al vacío, equipos donde se realiza la cristalización de la sacarosa. En el tacho se introducen núcleos de sacarosa previamente formados, de tamaño homogéneo para lograr un crecimiento de los cristales de azúcar de manera uniforme. Este proceso incluye además, equipos que comúnmente se les llaman cristalizadores donde se intenta lograr el agotamiento de la sacarosa contenida en la miel que acompaña al cristal, formado por enfriamiento (Hugot, 1987).

La cristalización se realiza en tanques de vacío de efecto simple a presión reducida. El jarabe o las aguas madres de cristalizaciones anteriores (melazas), se evaporan hasta su saturación de azúcar; en este punto, los granos se separan de la masa en ebullición y sirven como núcleo para la formación de cristales. El producto que se crea después de la formación de los cristales del tamaño y pureza que se quieren se llama masa cocida. (Hugot, 1987).

En esta etapa, la masa cocida se lleva hacia las centrífugas para separar el cristal de azúcar de la miel. Las centrífugas, son equipos que giran a altas revoluciones por minuto y poseen en su interior una malla de finos agujeros que permiten sólo el trabajo de la miel, mientras que bloquea el paso de los granos de azúcar que quedan atrapados en la parte interna de la malla. La miel separada en la masa cocida tercera de baja pureza, se conoce como miel final o miel de purga, la cual es un subproducto del proceso fabril y no se retorna al proceso por su bajo contenido de sacarosa (Cardona, 2009).

1.1.1. La calidad en el proceso de producción de azúcar crudo

El análisis de la calidad en el proceso de producción de azúcar crudo es de vital importancia para el desarrollo de la agroindustria azucarera, pues aumenta el rendimiento de esta actividad en los países productores de azúcar, y a su vez el desarrollo del país (Jiménez *et al.* 2016)

Larrahondo (1995), plantea que se emplea la concentración de sólidos disueltos (°Brix), la concentración de sacarosa en jugo (% Pol) y la pureza como indicadores de calidad del jugo. Sin embargo, en investigaciones más recientes Zhou *et al.* (2008) señalan que la calidad se reconoce en la molienda por la cantidad de azúcar recuperable que se obtiene por tonelada de caña molida. Ello depende en gran medida de la alta concentración de sacarosa, bajo contenido de materiales extraños, bajo contenido de sólidos solubles diferentes a la sacarosa, y bajo contenido de fibra.

El cogollo tiene alta incidencia en los niveles de color y de impurezas como los polisacáridos solubles, y representa la principal fuente de entrada de almidón al proceso. Esto último se debe al desarrollo del corte mecanizado, pues aumenta la cantidad de materia extraña, que generalmente entra con el cogollo y hojas (Larrahondo, 1995).

Según Larrahondo (1995), los principales factores que afectan la calidad del jugo de caña después del corte son: grado de quema y altura del corte. El grado de quema influye en los azúcares reductores, los cuales aumentan con el deterioro de la caña e incrementan el color del cristal del azúcar. El color del azúcar crudo es un parámetro de calidad importante, pues este incide en los costos de refinación para obtener azúcar blanca (Zossi *et al.* 2010).

El almidón constituye una impureza que afecta negativamente el proceso de producción de azúcar crudo y el proceso de refinación en cuanto a calidad y cantidad (Zhou *et al.* 2008).

Según Penados (2004), la presencia del almidón en el proceso tiene una importancia relevante para la comercialización del azúcar, pues el contenido de almidón es un parámetro de calidad que se tiene en cuenta para la compra de este producto en el mercado internacional y crea posibilidades de penalización impuestas por las refinerías que parten del azúcar crudo. Es por ello que las refinerías establecen multas financieras a las fábricas que entregan azúcar crudo con concentraciones de almidón mayor que 250 ppm (Eggleston *et al.* 2013 y Cole *et al.*, 2014).

1.2 Características y propiedades del almidón

La valoración de las plantaciones cañeras ocupa a diversas generaciones de investigadores que convergen en que la calidad del jugo afecta el procesamiento de la caña y la recuperación de la sacarosa en los ingenios, es por esto que se reconoce que algunos polisacáridos como los almidones reducen y dificultan la filtración durante el proceso químico, ya que se incorporan en los cristales del azúcar crudo.

El almidón es un polímero de glucosa que se localiza en el protoplasma de las hojas de la caña y en el extremo del tallo de la misma. Eggleston *et al.* (2007) plantea que los mayores depósitos de este polisacárido se encuentran habitualmente cerca de los nudos a partir del cual se propaga la caña. Chen *et al.* (2016) afirma que el almidón existe en gránulos semicristalinos de 1 a 10 μm en el tejido y en el jugo extraído de la caña de azúcar.

1.2.1 Estructura química del almidón

Según Zhou *et al.* (2008), la estructura del almidón la componen dos polisacáridos químicamente distinguibles: la amilosa y la amilopectina. Brumovsky (2014), muestra que la amilosa es polímero de unidades de D-glucosa, unidas por enlaces α -1,4 glucosídicos, esencialmente lineal.

Esta molécula no es soluble en agua, pero puede formar micelas hidratadas por su capacidad para enlazar moléculas vecinas por puentes de hidrógeno y

generar una estructura helicoidal (Knutzon y Grove, 1994). En presencia de yodo la amilosa toma un color azul oscuro. Se comprobó que el almidón extraído de la caña de azúcar posee un 20% de amilosa (Chen *et al.* 2016).

Brumovsky (2014), afirma que en la estructura del almidón cerca del 70% de la masa de su grano se considera amorfo y el 30% cristalino. En las zonas amorfas se localiza la mayor parte de la amilosa, aunque también una fracción considerable de la amilopectina.

La amilopectina es un polímero ramificado de unidades de glucosa unidas por enlaces α (1-4) y en un 4-6% con uniones α (1-6); es parcialmente soluble en agua caliente y en presencia de yodo produce un color rojizo violeta (Guan y Hanna, 2004; Zhou *et al.* 2008). Esta forma la encubierta o envoltura del gránulo, y es la que al gelificar forma el engrudo (Chen *et al.* 2016).

1.2.2 Gelatinización y otras propiedades del almidón

Según Brumovsky (2014), los gránulos de almidón intactos no son solubles en agua fría, pero pueden embeber pequeñas cantidades de agua de forma reversible, lo que ocasiona un pequeño hinchamiento.

Cuando los gránulos de almidón se calientan en presencia de agua, sufren un proceso que se llama gelatinización. La gelatinización es la ruptura del orden molecular dentro del gránulo. La evidencia de la pérdida del orden, incluye hinchamiento irreversible del gránulo, pérdida de birrefringencia y pérdida de estructura cristalina (Brumovsky 2014).

Referente a lo anterior Ramírez (2012), en su investigación señala que entre 70°C y 80°C se genera una pasta y se prolonga el calentamiento se produce la desintegración, disminuye la viscosidad y ocurre la solubilización parcial de los gránulos de almidón, primero se gelatinizan los gránulos más grandes y por último los más pequeños.

La pasta de almidón que se obtiene después de la gelatinización no es estable, ya que durante el almacenamiento se presentan transformaciones estructurales que, en conjunto, reciben el nombre de retrogradación (Biliaderis, 1992 y Hernández *et al.* 2008).

La retrogradación es otra propiedad del almidón, Ramírez (2012), la define como la insolubilización y la precipitación espontánea, principalmente de las

moléculas de amilosa, ya que sus cadenas lineales se orientan paralelamente y accionan entre sí por puentes de hidrógeno a través de sus múltiples hidroxilos.

Otros criterios como el de Chiu y Solarek (2009), establecen que la retrogradación ocurre cuando la solución de almidón concentrada se enfría y en ausencia de agitación se forma un gel rígido. Se encuentra dentro de los efectos de la retrogradación: incremento de viscosidad, desarrollo de turbidez u opacidad, precipitación de partículas insolubles y formación de geles.

1.2.3 Efecto de enzimas sobre el almidón

El almidón bajo la acción de amilasas, puede tener sus moléculas fraccionadas o agrupadas. Las reacciones químicas que ocurren bajo la actividad de estas enzimas dependen del pH del medio, la temperatura, el sustrato, el tipo específico de enzima, etcétera.

Las amilasas tienen función de catalizador en las reacciones que modifican la molécula de almidón. Se pueden clasificar estas enzimas en los siguientes grupos:

- Enzimas que mediante licuefacción o solubilización pueden degradar en formas completa las moléculas de almidón.
- Enzimas que inducen la degradación del almidón hasta productos que se clasifican como dextrinas, las cuales producen también pequeñas cantidades de azúcares.
- Enzimas que hidrolizan el almidón a un elevado porcentaje de azúcares, como maltosa y dextrosa.
- Enzimas que fraccionan la molécula de almidón, las cuales introducen grupos químicos.
- Enzimas que inducen el fraccionamiento de las moléculas de almidón, seguido por el "reordenamiento" de los compuestos formados. La acción de los dos últimos tipos de amilasa puede ser clasificada de acuerdo con las siguientes subdivisiones: licuefacción, dextrinización y sacarificación.

1.2.4 Algunas reacciones del Almidón

Como el almidón está compuesto por unidades de glucosa que se entrelazan por enlaces glucosídicos, las moléculas se pueden hidrolizar por ácidos en algunos casos (o en todos) los puntos donde ocurre este tipo de unión.

Puede ocurrir condensación de moléculas, si se toma en cuenta la disponibilidad, al menos de forma potencial del grupo aldehído. Como las moléculas poseen grupos de alcohol de tipo primario y secundario, y grupos aldehídos, se pueden oxidar en uno o en muchos de estos puntos. Los grupos de alcohol pueden dar origen a ésteres, cuando actúan bajo la acción de ácidos orgánicos e inorgánicos. Los grupos hidroxilo de almidón se pueden convertir en éteres y alcoholatos por la acción de metales o hidróxidos metálicos.

El almidón puede sufrir degradación y producir otros compuestos de menor peso molecular por la acción de ciertos agentes oxidantes, por la acción de enzimas, o por la acción intensa del calor.

1.3 Influencia del almidón en el proceso de producción de azúcar crudo

La agroindustria azucarera es una de las más grandes y competitivas del mercado internacional y en Cuba no es la excepción. Por tal motivo, los ingenios azucareros del país, cada día desarroan nuevas investigaciones para poder competir a nivel local e internacional y así lograr un producto que cumpla y supere las expectativas de sus clientes.

Según Boyes (1960), el almidón forma base para una cantidad considerable de discusiones y escritos interesantes. Gran número de investigaciones se dirigen a evaluar cada temporada de producción, particularmente, del grado en que la caña deteriorada afecta la producción de azúcar crudo con alto contenido de almidón, de ahí la importancia de analizar su influencia.

Según Castro (2015), existen algunas diferencias significativas entre variedades, la cuales son generalmente elegidas para satisfacer las condiciones agronómicas, por ejemplo: irrigación o lluvia, maduración temprana, tipo de suelo, duración del periodo de crecimiento y el sistema de cosecha. La dureza de la caña y la disposición de la fibra varían de una variedad de caña a la otra, lo que puede afectar su comportamiento en la planta. Godshall *et al.* (1990) afirma que la concentración de almidón en caña

depende de la variedad y su estado de madurez. Al tener en cuenta esta información se puede concluir lo que plantea Zossi *et al.* (2008) que enuncia que la concentración del almidón en la caña depende de la variedad, la cual debe oscilar entre 200 y 1200 mg/kg °Bx sobre base sólida.

Penados (2004) y Godshall *et al.* (2004) en sus investigaciones, mencionan que el uso de la cosecha mecanizada aumenta el contenido de polisacáridos que son incorporados al proceso, y dentro de ellos el almidón; esto se debe a la cantidad de hojas y demás compuestos orgánicos que entran a la fábrica junto con la caña.

Los granos de almidón se extraen del jugo desde la etapa de molienda. El comportamiento de los granos de almidón en el proceso de filtración y calentamiento influyen de una forma negativa en la fábrica. En el jugo primario el almidón no es soluble. Si la fábrica tiene maceración en caliente o agua de imbibición, el agua arrastra los gránulos del tejido vegetal desmenuzado en el jugo, y el calor inflama los gránulos, lo cuales se vuelven parcialmente soluble y se gelatinizan (Godshall *et al.* 1991).

La solubilización y gelatinización del almidón se completan durante el proceso de clarificación y evaporación. Durante la clarificación y la evaporación, los granos de almidón fuertemente se calientan, rompen los enlaces entre amilosa y amilopectina, y se transforman en una solución viscosa amorfa. (Godshall *et al.* 1991)

Gracias al calor este pasa a los jugos y, una parte se elimina en la clarificación, mientras el resto de alguna manera permanece en el proceso, y entre un 30% y 40% de este polisacárido se incrusta en el cristal de azúcar crudo durante la cristalización (Reina, 2007). Todo esto trae como consecuencia que se afecte la formación de cristales y la eficiencia de la centrifugación, los almidones se ocluyan en el cristal de sacarosa, aumente la producción de melaza, ocurra una disminución de la filtrabilidad de azúcares crudos, e impida la decoloración en la refinación (Eglesston *et al.* 2008).

En el caso, de la clarificación por fosfatación el almidón modifica en forma adversa la precipitación y coagulación del fosfato de calcio, lo que genera un alto nivel de fosfato en el licor claro. Además, la fracción de amilopectina estabiliza los cristales de fosfato de calcio en suspensión que causa la

formación de coágulos densos y grandes, difíciles de eliminar por flotación (Zossi *et al.* 2008)

Otros autores como Van der Poel *et al.* (1998) y Cuddihy *et al.* (2001), establecen que el contenido de almidón en jugo mayor de 250 mg/kg en base seca, causa problemas durante el proceso de elaboración de azúcar como: el aumento de la viscosidad por efecto de la gelatinización de los gránulos de almidón y la dificultad en los procesos de filtración, decantación, evaporación y cristalización, así como también al incremento de la pureza de las melazas.

Castro (2015), señala que el almidón además de provocar el aumento de viscosidad, se adhiere a las paredes de los tachos, lo que aumenta el tiempo de cocción de las masas y por consiguiente, disminuye la eficiencia del proceso. Además, afirma que cuando se producen altas viscosidades en los jugos de caña provoca una disminución de la transferencia de calor en los evaporadores, cristalizadores y tachos, lo cual incrementa el punto de ebullición unido a un incremento de los costos energéticos.

1.4 Métodos de medición del almidón en el proceso

El almidón provoca varios efectos negativos en el proceso de elaboración de azúcar, es por esto que surge la necesidad de cuantificarlo, a través de diversas técnicas analíticas, tanto para la determinación de almidón en jugos como en el azúcar final.

Existen numerosas técnicas analíticas, tales como las que establecen los autores ICUMSA (2005), COPERSUCAR (2004) y Matic (1971). Cada una de estas técnicas se utiliza tanto para evaluar el contenido de almidón en los jugos durante las diferentes etapas del proceso de elaboración de azúcar, como para determinar su concentración azúcar crudo (Zossi *et al.*, 2008).

Para optimizar estas metodologías Godshall *et al.* (2004) y Godshall *et al.* (2004) desarrollaron en el *Sugar Processing Research Institute* (SPRI), un método rápido que se puede emplear por cualquier laboratorio de fábrica para determinar almidón en azúcares y productos azucarados (Zossi *et al.* 2008).

Según Zossi *et al.* (2008), las ventajas que presenta este método frente a los anteriores es que no se basa en la precipitación del almidón mediante alcohol absoluto, ni en su solubilización por cloruro de calcio, sino en la gelatinización

del almidón mediante ebullición y posterior reacción colorimétrica con yodo, lo que implica un ahorro importante de reactivos y tiempo. Además, constituye un método sencillo y fácil de realizar en cualquier laboratorio de la fábrica. Este método lo sugiere CUMSA (2005) como método tentativo.

Bolaños (2012), reconoce el método propuesto por ICUMSA GS1-17 (2005) *The determination of Starch in Raw Sugar by the SPRI Rapid Starch Method* y explica que este se basa en la gelatinización del almidón, adición de KI y KIO_3 para producir yodo, luego el yodo reacciona con el almidón y forma complejo azul/púrpura, posteriormente se realiza una medición a 600 nm y se comparan los resultados con la curva de calibración que se preparó con almidón de papa. El método de adición de yoduro de potasio y yodato de potasio que desarrolló el SPRI, se basa en la detección calorimétrica del complejo almidón –yoduro. Una vez que se determinan los límites de detección y cuantificación, linealidad e incertidumbre, se demuestra que por esta metodología es posible determinar concentraciones de almidón en diferentes tipos de azúcar en un intervalo comprendido entre 33 y 2667 mg/kg, con una incertidumbre de $\pm 6,18$ mg/kg. La comparación de este método con la técnica establecida por COPERSUCAR y empleada en los laboratorios de la Sección Química (EEAOC), permite llegar a la conclusión de que a pesar de no ser iguales estadísticamente, existe una correlación altamente significativa entre ellas, además de que la nueva metodología presenta un valor de incertidumbre menor (Zossi *et al*, 2008).

ICUMSA (2007) plantea el *''Draft Method No. 3*, este método consiste en la capacidad del almidón de formar en medio ácido un complejo almidón-yoduro de color azul violeta al reaccionar con yodo–yodato, esta sustancia coloreada luego se puede medir a 570 nm en un espectrofotómetro.

Este método no fue estadísticamente validado, por lo que no tiene el carácter de "Método ICUMSA", pero está disponible para que los usuarios de estas metodologías realicen estudios más profundos. Gracias a su sencillez, rapidez y bajo costo, el Laboratorio de la Sección Química de la Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres (EEAOC) decidió validarla para implementarla en sus determinaciones de almidón en jugos de caña de azúcar. Esto se logra mediante la realización de cálculos para determinar repetibilidad, reproducibilidad e incertidumbre para las condiciones del Laboratorio de

Investigaciones Azucareras de la Sección Química de la EEAOC (Zossi *et al*, 2011).

En Cuba, las técnicas experimentales más comunes en los ingenios azucareros para la determinación del contenido de almidón en jugos y en azúcar crudo, se realizan basándose en la determinación espectrofotométrica del almidón mediante un método muy similar al SPRI, propuestas en el Manual de métodos analíticos para azúcar crudo (Macu, 2004).

1.5 Métodos de control y eliminación del almidón en la industria azucarera.

De acuerdo con los criterios que se plantean en el epígrafe anterior, se hace evidente la necesidad de la puesta en práctica de mecanismos de control y reducción del almidón en el proceso azucarero y así aumentar el rendimiento en las industrias.

Como ya se mencionó, el almidón entra a la fábrica con las impurezas que presenta la materia prima, en este caso, la caña de azúcar; es por este motivo que Zhou *et al.* (2008), plantea como una de las metodologías el mecanismo de prevención, el cual se basa principalmente en la realización de una cuidadosa selección de variedades de caña sobre la base del contenido de almidón, pero aun así persiste la presencia del almidón en el proceso solo que a bajas concentraciones.

Según Penados (2004), también puede ayudar el uso de agua de imbibición fría ya que el almidón tiende a coagularse entre los 65 y 80°C. Lamentablemente esto no es posible porque el uso de agua de imbibición debe de ser caliente pues de esta manera se logra una mejor extracción de sacarosa en el departamento de molinos.

La eliminación de almidones por métodos físicos de separación como ultrafiltración u ósmosis inversa, funcionan correctamente en pequeña escala laboratorio y piloto, pero están lejos de ser desarrollados para su aplicación en los procesos reales (Rohde, 2006).

Según Jiménez *et al.* (2016), en otros estudios se prueban varios métodos para eliminar o reducir los efectos del almidón, así como la extracción mecánica del almidón insoluble, la centrifugación del jugo y la clarificación al vacío. Pero

estos exigen grandes inversiones que encarecen su uso, y ofrecen resultados parciales ya que no eliminan la fracción soluble.

Según Chiu y Solarek (2009), en la actualidad se emplean solo enzimas hidrolasas (amilasas) para modificar el almidón. Como ejemplo de esto Eggleston *et al.* (2003), hace mención de una fábrica en Estados Unidos donde el jugo filtrado del clarificador se recicla en un tanque de incubación de amilasas para reducir la acidez de jugo de caña de azúcar, y a su vez la amilasa natural hidroliza el contenido de almidón.

El alfa-amilasa es una enzima líquida estable a variaciones térmicas, esta enzima se obtiene de la modificación genética del Bacilo *Licheniformis*. La función de esta enzima es hidrolizar el enlace 1-4 alfa-glucósido entre la amilosa y la amilopectina de tal manera que el almidón se divide en varios oligosacáridos que ya no originan problemas en la manufactura de azúcar crudo (Penados, 2004).

La hidrólisis del almidón es una de las aplicaciones más extendidas del alfa-amilasa. La conversión enzimática incluye la gelatinización que involucra la disolución de los gránulos de almidón de lo cual se forma una suspensión viscosa, la licuefacción que involucra la hidrólisis parcial, disminución de la viscosidad y la sacarificación que involucra la producción de la glucosa y maltosa como una extensión de la hidrólisis (Monteiro y Oliveira, 2010).

El proceso de degradación del almidón gelatinizado se lleva a cabo en dos etapas, la licuefacción y la sacarificación. En la primera etapa se disminuye la viscosidad de la muestra, con lo que se consigue evitar la retrogradación del almidón. Si la muestra con elevada viscosidad se enfría, se produce una cristalización de la amilosa la cual se torna insoluble (almidón retrogradado) y por tanto las enzimas no pueden hidrolizarla (Barros, 2012)

Para lograr un trabajo óptimo de esta enzima, Zhou *et al.* (2008) establece que: la hidrólisis es más eficaz cuando los gránulos de almidón solubilizan y gelatinizan parcialmente por la maceración en caliente o el agua de imbibición. También explica que la degradación del almidón se produce a bajas concentraciones de amilasas, esto produce un incremento del tiempo de retención; y la elevación de este tiempo a la vez provoca una degradación ácida no deseada de sacarosa.

Otro criterio dado por Eggleston *et al.* (2003), expresa que si en la clarificación se opera la alcalización en caliente una fracción del almidón es removido y precipita por el precalentamiento del jugo antes de alcalizar y clarificar. Sin embargo, Zhou *et al.* (2008) comenta que si se trabaja la alcalización en frío el suceso anterior no ocurre, solo una parte del contenido de almidón precipita durante el proceso de clarificación.

En el proceso de clarificación se remueve un poco de almidón por la precipitación; sin embargo no se reduce en grandes cantidades el almidón como para aliviar los problemas en el proceso es por ello, que la hidrólisis enzimática se aplica regularmente en la estación de evaporación. (Tester *et al.* (2004)

Según Zhou *et al.* (2008) es más eficiente adicionar α -amilasa en el pre- evaporador para hidrolizar el almidón presente en el jugo concentrado. Trabajos investigativos realizados por Penados, (2004) y Bolaños (2012), afirman que la α -amilasa normalmente se agrega al penúltimo o último vaso del múltiple efecto porque a estas condiciones de operación el almidón es un gel completamente soluble, y de esta forma se favorece la hidrólisis. También el pH, la temperatura, y tiempo de la retención en esta etapa propician la acción de la α -amilasa, para tiempos de retención de 12 min ocurre la degradación del almidón en un rango de 10 a 20% mediante la enzima α -amilasa. (Eggleston *et al.* (2006)

Para Eggleston *et al.* (2008), la hidrólisis de almidón con la alfa amilasa cuando los niveles de almidón en el jugo se encuentran alrededor de 1000 ppm/Brix es más difícil, es se debe al bajo contacto entre el almidón (el substrato) y la enzima. Este problema puede mitigarse si se aumenta la dosis de solución activa de alfa amilasa la cual es agregada al penúltimo evaporador del múltiple efecto (Eggleston *et al.* 2008b; Zhou *et al.*, 2008).

Para la aplicación de esta enzima en nuestros ingenios se hace necesario conocer los costos que este procedimiento traería consigo. Según Alonso, (2017) la aplicación de la enzima α -amilasa para la eliminación del almidón en los ingenios azucareros y refinerías, trae consigo el desarrollo de métodos de producción de enzimas más eficientes, que ayuden a reducir los precios de las mismas. Los costos de la aplicación enzimática usualmente están por debajo de 1 USD por tonelada de caña triturada, mientras que las pérdidas financieras

por el deterioro de la caña con concentraciones normales de almidón se acumulan fácilmente por arriba de 2 USD por tonelada triturada.

1.6 Determinación y estudio del comportamiento del almidón

Durante el proceso de elaboración de azúcar crudo, como así también en la producción de azúcar refinado el contenido de almidón es un parámetro importante a considerar, es un microcomponente indeseado ya que origina problemas durante las distintas etapas de elaboración y en el producto final; su presencia incrementa la viscosidad en los fluidos durante las etapas de fabricación de azúcar, disminuye la velocidad de cristalización e incrementa la pureza de las melazas (Godshall *et al.*, 2004), por este motivo, es necesario contar con un método confiable para su determinación.

El análisis del comportamiento del almidón requiere de la utilización de un espectrofotómetro, que se emplea para determinar las concentraciones de diferentes compuestos en solución.

Castro (2015), determina la concentración de almidón mediante el método espectrofotométrico en el jugo de caña de azúcar de tres variedades de caña. El método requiere mezclar el jugo de caña con una solución caliente de ácido acético/cloruro de calcio y adicionar una solución de yoduro/yodato de potasio para formar el complejo azul de almidón-yodo. Los resultados se obtienen mediante la comparación de medias y correlación de resultados de los cuales se encuentra una relación que demuestra que al aumentar la cantidad en meses de caña cosechada, aumenta la concentración de almidón en la misma. Según, Zossi *et al.* (2008) en su investigación realiza la comparación de dos metodologías para la determinación de almidón en azúcar en la cual realiza primeramente la curvas de calibración. En ella se valida la aplicación de la metodología COPERSUCAR para la determinación de almidón en azúcar. Los resultados obtenidos demuestran que la técnica es aceptable para determinar almidón en diferentes tipos de azúcares, en concentraciones comprendidas entre 25 y 600 mg/kg, con una incertidumbre de $\pm 10,8\%$. Además, para el procesamiento estadístico de los resultados usan las herramientas: Test de Student, Test de Grubbs para la selección de datos, Tabla ANOVA y Test F.

Referente a la aplicación de la enzima alfa amilasa para lograr la remoción del almidón en el proceso de producción de azúcar, Penados (2004), realiza un análisis experimental de la adición de la enzima alfa amilasa en la etapa de evaporación y seguido un análisis de los resultados experimentales para lo cual plotea los valores de absorbancia obtenidos para cada solución de almidón y realiza un análisis de regresión lineal y así obtener el modelo matemático que mejor se ajusta a los puntos de la curva.

1.7. Conclusiones parciales.

1. Unos de los principales parámetros que afecta la calidad de la industria azucarera es el contenido de almidón.
2. Entre las propiedades del almidón más importantes a considerar en el proceso de producción de azúcar crudo se encuentra la gelatinización.
3. El método más usado actualmente para la cuantificación del almidón es el sugerido por ICUMSA (2005).
4. En la etapa de molienda el almidón se solubiliza y pasa a los jugos, donde se elimina una parte de este en la etapa de clarificación.
5. La tecnología de hidrólisis enzimática es uno de los métodos más eficientes para el control del almidón en el proceso de producción de azúcar.

Capítulo 2 Materiales y Métodos

En el capítulo se desarrolla la caracterización del proceso de producción de azúcar crudo objeto estudio. Se describe el procedimiento para determinar el comportamiento del contenido de almidón en las diferentes corrientes del proceso objeto, para lo cual se utilizan las técnicas analíticas de determinación de almidón en jugos y azúcar crudo; conjuntamente se establece el método de validación de las curvas de calibración. Se detalla la metodología para comprobar el consumo de vapor en los calentadores, preevaporadores y múltiple efecto con el propósito de ver cómo influye el contenido de almidón en este. También se indica la metodología seguida para la valoración económica que genera el efecto del incumplimiento de las normas de calidad.

2.1 Descripción del caso de estudio

El caso de estudio se concentra en el análisis de la influencia del almidón durante las etapas de elaboración de azúcar crudo; pues la presencia de altas concentraciones de este en la producción de azúcar constituye un factor de riesgo para la economía del proceso, ya que afecta dicho producto en cantidad y calidad, por ello es preciso realizar una descripción del proceso productivo.

2.1.1. Descripción general del proceso objeto de estudio.

El estudio se realiza en la Unidad Empresarial de Base (UEB) “Mario Muñoz Monroy”, donde se desarrolla el proceso de elaboración de azúcar crudo, el cual implica el desarrollo de 4 etapas fundamentales: etapa de recepción, preparación y molienda de la caña, etapa de purificación, etapa de evaporación y etapa de cristalización y centrifugación. En el anexo 1 se muestra el diagrama general del proceso de producción de azúcar crudo.

2.1.2 Definición de las etapas del proceso de producción de azúcar crudo

Para tener una mejor comprensión de la influencia del almidón en cada etapa del proceso, se establece el desarrollo de cada una de ellas con sus parámetros de calidad y operación.

Etapa de recepción, preparación y molienda de la caña

La caña de azúcar se transporta desde el campo hacia el área de pesaje donde los camiones y ferrocarriles se pesan para conocer la cantidad de caña que se va a procesar.

Al llegar la caña pasa a la estera recibidora y después a la estera elevadora. Luego toda la materia prima pasa por 2 cuchillas con el objetivo de picar en partes pequeñas la caña y hacer un colchón, preparándola así para la etapa de molienda.

La extracción del jugo se lleva a cabo en la planta moledora o tándem, el cual está compuesto por 6 molinos Hamilton con 4 mazas cada uno, las cuales se denominan alimentadora, superior, cañera y bagacera, que deben sus nombres a la posición que ocupan con respecto al flujo de caña que procesan. Ellos son los encargados de extraerle la mayor cantidad de sacarosa a la caña. La primera unidad realiza el 60% de la extracción como mínimo y el 40% restante en las subsiguientes unidades de molienda. Para mejorar la extracción de sacarosa, se aplica agua de imbibición a la salida del quinto molino y entrada del sexto, esto hace que el jugo que queda en el bagazo se diluya con el agua, de manera que el jugo que queda con el bagazo después del último molino se diluye mucho más con un menor contenido de sacarosa. Del último molino se obtiene jugo mezclado y bagazo, el cual se quema en las calderas para producir vapor.

La planta de vapor cuenta con 4 calderas acuatubulares, 3 de 45 toneladas de vapor por cada hora y 1 de a 60 toneladas de vapor por hora. El vapor que producen es conocido como vapor directo, el cual se utiliza en los turbogeneradores de la planta eléctrica para generar electricidad. Una vez que sale el vapor de estos equipos se le conoce como vapor de escape de menor contenido calórico, y se usa en calentadores, equipos de evaporación y tachos, los cuales constituyen las necesidades tecnológicas.

Etapa de purificación

La función principal de los procesos de purificación es eliminar la mayor cantidad de impurezas presentes en el jugo mezclado.

El área de purificación recibe el jugo mezclado, donde se calienta a través de un calentador líquido – líquido. Seguidamente este jugo pasa al tanque de mezclado, en el cual se adiciona el jugo proveniente de los filtros, de ahí se envía al calentador primario (calentador 1) que recibe el vapor del segundo vaso del cuádruple, pasa al calentador secundario (calentadores 3) y luego al rectificador, los cuales reciben vapor de los preevaporadores.

Al finalizar este procedimiento el jugo pasa al tanque flash, donde se realiza la alcalización en caliente, que no es más que la adición de lechada de cal diluida en una proporción que va desde 500 y hasta 650 g de óxido de calcio por tonelada de caña molida. El tanque flash debe estar dotado de baffles y un sistema que garantice la mezcla adecuada de la lechada de cal y el jugo caliente.

Luego pasa a un tanque colector donde se le agrega floculante con el fin de que las impurezas que aún contiene se adhieran a los flóculos formados anteriormente, para así aumentar la velocidad de sedimentación.

Posteriormente el jugo pasa a los clarificadores (el flujo debe ser laminar para que no hallan turbulencias y ocurra la sedimentación de los flóculos) donde se somete a una operación de decantación para completar la reacción de formación y sedimentación de los flóculos de fosfato tricálcico para lograr una perfecta separación en dos fases, la primera jugo claro y la segunda cachaza.

El jugo claro se transporta por gravedad a un colador y después al tanque de jugo clarificado, de ahí se envía al calentador de jugo clarificado (calentador 4) que recibe vapor de escape proveniente de los turbogeneradores para elevar la temperatura del jugo hasta su temperatura de ebullición y así facilitar el trabajo en los preevaporadores.

Los lodos del clarificador se llevan a un mezclador donde se le adiciona bagacillo como medio filtrante en proporción suficiente como para formar una torta con buenas propiedades físico mecánicas. El proceso de agotamiento de la torta se lleva a cabo en los filtros rotatorios al vacío. Estos lodos se caracterizan por tener un pH en el entorno de 6 a 6,7, una relación sólido líquido del orden de 50%; su proporción es del orden del 16 al 25% en relación con la caña. En el filtro se le adiciona agua condensada contaminada caliente, alrededor de 75°C para agotar la torta de cachaza. De esta operación se obtiene cachaza y jugo filtrado, este último se recircula al tanque de jugo

alcalizado, como se mencionó anteriormente. Este proceder mejora mucho el área de purificación y condiciona una mejor eficiencia pues se eleva considerablemente su pureza y se logra aproximar a la del clarificado.

Etapa de evaporación

Esta etapa comienza con los preevaporadores, los cuales extraen una parte del agua presente en el jugo, dichos equipos trabajan con vapor de escape que viene de los turbogeneradores. Una ventaja de la utilización de los preevaporadores es que utilizan el vapor de escape sobrecalentado y entregan vapor saturado, el cual puede ser utilizado en las necesidades tecnológicas. Seguidamente el jugo pasa al cuádruple efecto, donde se elimina del 75 al 80% del agua presente en el jugo clarificado y concentrándolo desde 15 hasta 65 °Bx. El vapor solo se alimenta al primer vaso, al resto se alimenta vapor que se evapora del jugo del vaso anterior. El jugo que se obtiene en el último vaso se conoce como meladura.

Etapa de cristalización y centrifugación

En los tachos y sus equipos auxiliares se continúa la evaporación, ahora más lenta, hasta obtener el cristal de azúcar. Este proceso consiste en añadir un pie de meladura y cristal 600 a un tacho, seguidamente se procede a calentar y se obtienen dos pies de grano fino, los cuales son enviados al granero, luego se distribuyen un pie para cada tacho obteniéndose dos masas cocidas B que se transportan al cristalizador y después a las centrifugas de donde se obtiene semilla B y miel B. esta miel es la miel final ya que el proceso de cristalización que se realiza en la zafra objeto de estudio es de dos masas cocidas.

La semilla que se obtiene se envía al cristalizador o a un colector de centrifugas, estos dan lugar a la semilla de repulga y miel de repulga, esta miel se transporta a los tanques de meladura y la semilla de repulga al semillero, de los cuales se toma un pie para cada tacho y se alimentan con meladura, masa cocida A, seguidamente pasa al portatempla, el cual lo distribuye para el cristalizador, luego al tanque mezclador y por último a las centrifugas discontinuas; de las cuales se obtiene el azúcar comercial y miel A, que se alimenta nuevamente a los primeros tachos para la nueva producción.

2.2 Determinación del comportamiento del contenido de almidón en el proceso de producción de azúcar crudo

Para determinar el comportamiento del contenido de almidón en el proceso de obtención de azúcar crudo es necesario cuantificar el almidón en las corrientes del proceso y utilizar herramientas estadísticas para el procesamiento de los resultados obtenidos. En la figura 2.1 se muestra el procedimiento para el desarrollo de la etapa experimental y la depuración de los resultados obtenidos.

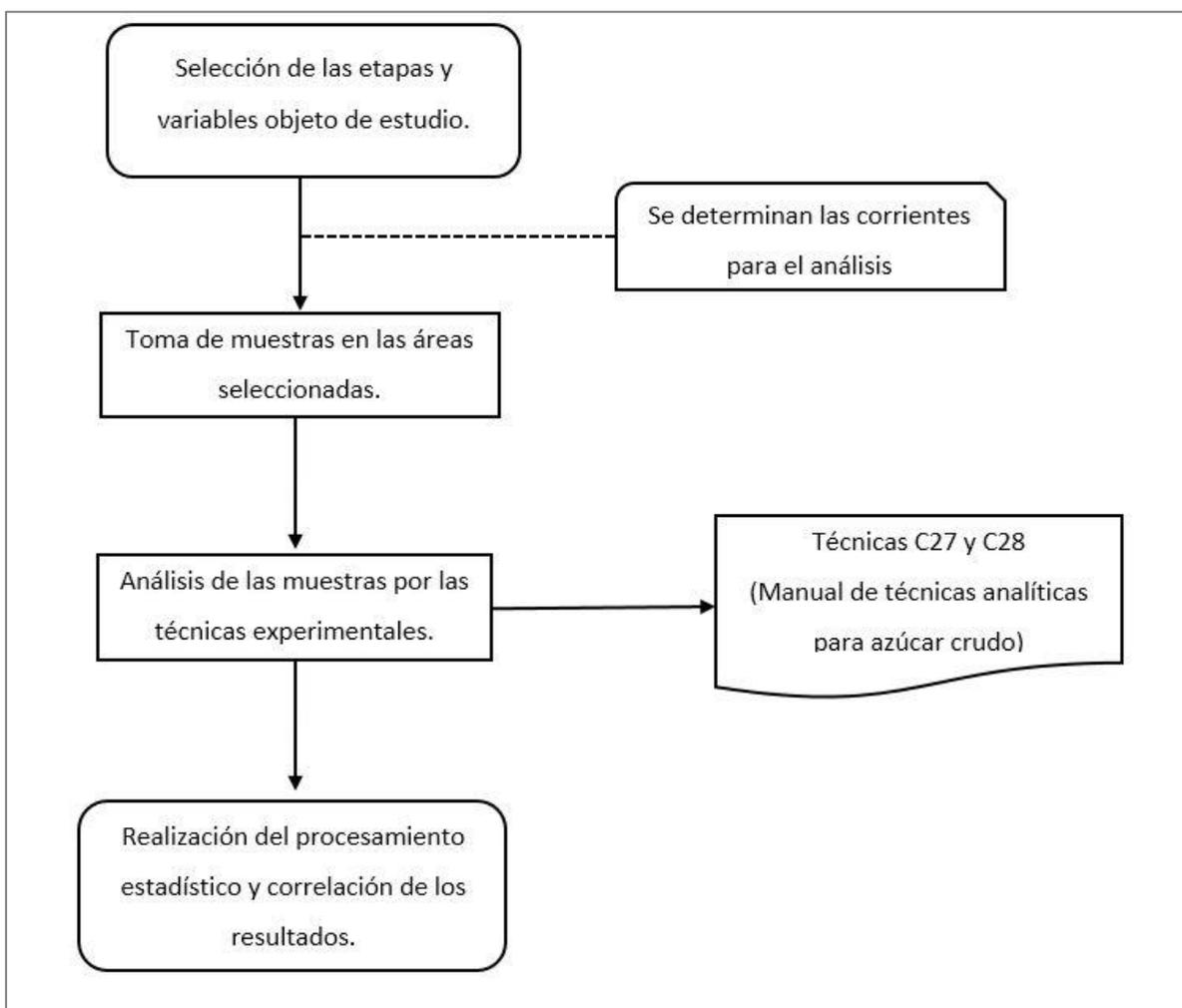


Figura 2.1. Procedimiento para definir el comportamiento del contenido de almidón en el proceso.

2.2.1 Selección de las corrientes de muestreo

Para establecer el comportamiento del almidón en el proceso de producción de azúcar crudo, se seleccionan las corrientes principales de cada etapa, pues el almidón entra al proceso con la caña y continúa en el jugo hasta salir en el azúcar crudo. En la figura 2.2 se presentan los puntos de muestreo para el control analítico del almidón.

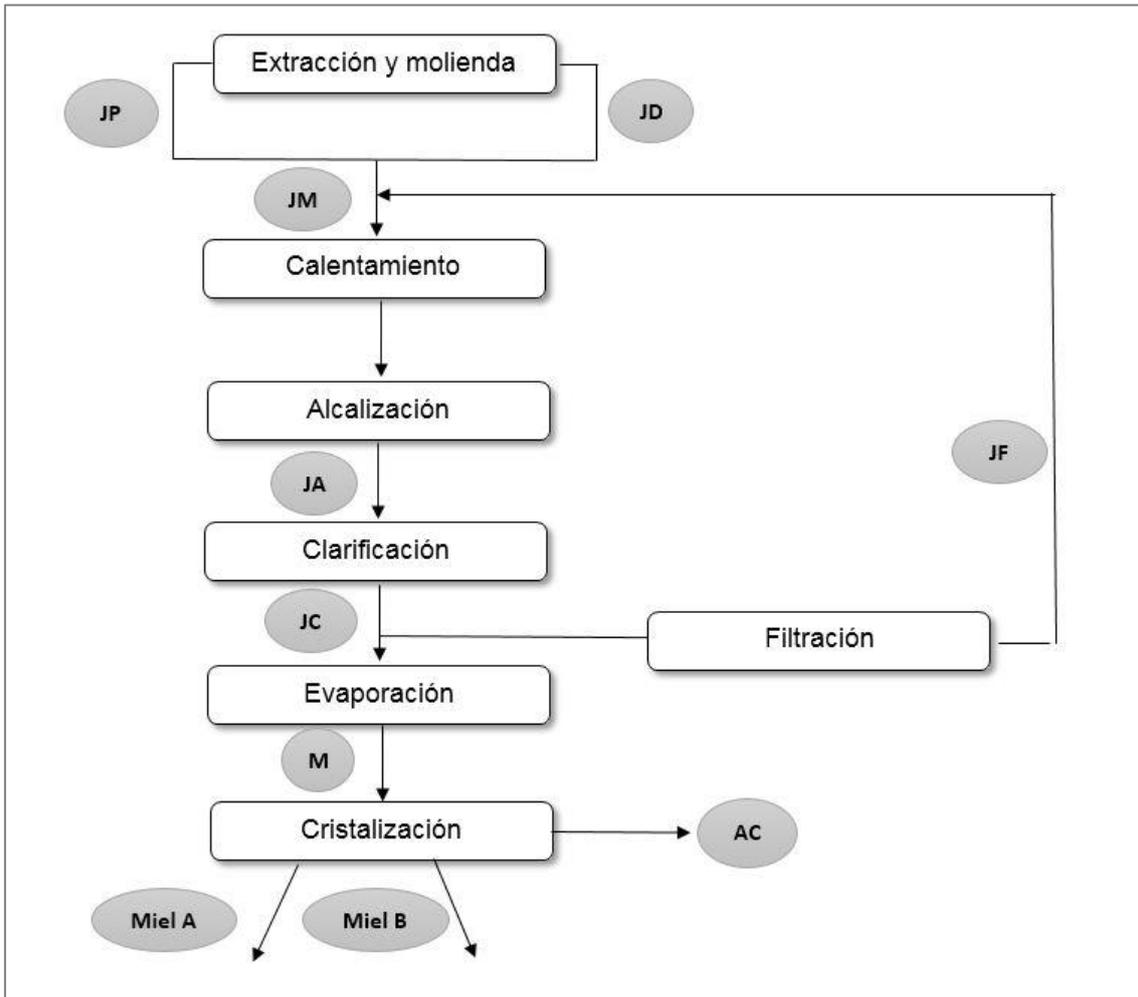


Figura 2.2. Puntos de muestreo en el proceso.

Donde:

JP: Jugo Primario

JD: Jugo Diluido

JM: Jugo Mezclado

JA: Jugo Alcalizado

JC: Jugo Clarificado

JF: Jugo Filtrado

M: Meladura

Miel A: Miel A

Miel B: Miel B

AC: Azúcar Crudo

La etapa experimental se desarrolla en el laboratorio químico del central azucarero “Mario Muñoz Monroy” con la ayuda del personal y los especialistas de la fábrica.

El muestreo se realiza durante 10 días, la toma de muestra se realiza de forma compuesta por 15 minutos para obtener una muestra más representativa y después se llevan al laboratorio donde se le aplica la técnica analítica correspondiente, con tres réplicas en cada corriente, para la determinación de almidón en jugo y en azúcar crudo.

2.2.2 Determinación analítica del contenido de almidón

Las técnicas para determinar el contenido de almidón en jugo y azúcar crudo que se seleccionan son las C27 y C28 expuestas en el Manual de Métodos Analíticos para Azúcar Crudo (MACU). Estas técnicas conservan el mismo principio que los métodos sugeridos por ICUMSA (2005) y son las que se emplean en los laboratorios de los centrales azucareros del país.

Técnica para la determinación del contenido de almidón en jugo

Técnica C27. Determinación espectrofotométrica de almidón en jugos. Método de la SMRI.

1. Alcance y esfera de aplicación: El método, como se describe a continuación, es aplicable a jugos.
2. Fundamento del método: Se basa en la precipitación de los polisacáridos con etanol, la redisolución del almidón con solución de cloruro de calcio (con pH ajustado) y la ulterior formación del complejo de absorción triyoduro almidón, originado por el yodo formado in situ.
3. Reactivos: Agua destilada, Solución de ácido clorhídrico, aprox. 10 % v/v, Tierra de infusorios tratada con ácido, Ácido acético glacial, $d_{20}=1.05$ g/ml, Solución de cloruro de calcio, aprox. 40 g/100 ml con pH ajustado, Solución de ácido acético, $c(\text{HCH}_3\text{COO})\approx 2.0$ mol/l, Etanol 96 % v/v (como mínimo), Solución de etanol, aprox. 80 % v/v, Solución de referencia de almidón 0.8 g/l,

Solución de yodato de potasio, $c(\text{KIO}_3)=0.00167 \text{ mol/l}$, Solución de yoduro de potasio, aprox. 10 g/100 ml.

4. Utensilios e instrumentos: Probetas de 10, 50, 200 y 1 000 ml, Papel de filtro (velocidad media), Embudos Büchner, Kitasato, Bandeja esmaltada, Embudo de vidrio, Matraces aforados de 25, 50, 100 y 1 000 ml, Beakers de 250, 400 y 2000 ml, Pipeta de descarga total de 20 ml, Pipetas graduadas de 1, 5 y 10 ml, Bureta de 25 ml que aprecie 0.1 ml, Agitador, Bomba de vacío, Balanza que aprecie 0.1 mg y 0.1 g, Refractómetro, Plancha eléctrica graduable, Espectrofotómetro, Potenciómetro de apreciación de 0.1 unidades de pH. Desecadora, Estufa.

5. Procedimiento.

Preparación de la porción de ensayo: Homogenizar la muestra de jugo, que debe ser representativa de la población que desea analizar y determinarle el Brix. Pesar 20.0 g (mi) y depositarlos en el beaker de 250 ml, adicionar 80 ml de etanol y 2.0 g de tierra de infusorios. Agitar y cubrir el beaker con un vidrio reloj, dejar en reposo durante 15 min y filtrar mediante presión reducida.

Determinación: Trasvasar cuantitativamente el precipitado obtenido en la preparación de la porción de ensayo a un beaker de 400 ml, se adiciona 40 ml de solución de cloruro de calcio acidificada, después se cubre con un vidrio reloj y mantenerlo 15 min en ebullición suave. Enfriar esta solución, trasvasarla cuantitativamente a un matraz de 100 ml y después de enrasar con agua destilada, adicionar 1.7 ml más de agua para compensar el volumen ocupado por la tierra de infusorios. Homogenizar, filtrar y desechar los primeros 10 ml. Tomar 20.0 ml del filtrado y depositarlo en un matraz de 50 ml y adicionarle 2.5 ml de solución de ácido acético, 0.5 ml de solución de yoduro de potasio recién preparada y 5.0 ml de solución de yodato de potasio. Enrasar con agua y medir la absorbancia a 600 nm en una celda de 1 cm. Se utiliza como blanco una solución preparada adicionando, en un matraz de 50 ml, 8 ml de solución de cloruro de calcio acidificada, y los mismos volúmenes anteriores de los reactivos: solución de ácido acético, solución de yodato de potasio y solución de yoduro de potasio, después enrasar y homogenizar.

Técnica para la determinación del contenido de almidón en azúcar crudo

Técnica C28. Determinación espectrofotométrica de almidón en azúcar crudo.

1. Alcance y esfera de aplicación. Este método es aplicable a azúcar crudo.
2. Fundamento del método: Se basa en la selectividad del cloruro de calcio, a determinado pH, para separar al almidón de los otros polisacáridos que lo acompañan, y en la propiedad de esta sustancia para formar un complejo de absorción con el ion triyoduro, cuyo espectro presenta una absorción proporcional a su concentración.
3. Reactivos: Agua destilada, Solución de cloruro de calcio, aprox. 40 % m/m, Solución de ácido acético, c (HCH₃COO)≈1.0 mol/l, Solución de ácido acético (aprox. 0.033 mol/l), Solución de cloruro de calcio-ácido acético, Solución de yoduro de potasio, aprox. 10 g/100 ml, Solución de yodato de potasio, c(KIO₃)=0.00167 mol/l, Solución matriz de referencia de almidón (900 mg/l), Solución de referencia de almidón (180 mg/l), Sacarosa libre de almidón.
4. Utensilios e instrumentos: Matraces aforados de 25, 50, 100 y 1 000 ml, Probetas de 10, 25 y 100 ml, Bureta de 50 ml que aprecie 0.1 ml, Pesafiltro pequeño, Pipetas de descarga total de 10, 20 y 25 ml, Pipetas graduadas de 1,5 y 15 ml, Balanza de apreciación 0.1 mg, Potenciómetro de apreciación 0.1 unidades de pH, Baño de agua hirviente, Espectrofotómetro, Agitador de vidrio, Erlenmeyer de 1 000 ml, Dispensador automático de líquidos, Estufa Desecadora.
5. Procedimiento.

Preparación de las soluciones de referencia: En cada uno de los siete matraces aforados de 50 ml depositar 3.60 ± 0.02 g de sacarosa libre de almidón. Adicionar, utilizando pipetas, alícuotas de 0.0, 1.0, 2.0, 4.0, 6.0, 8.0 y 10.0 ml de la solución de referencia de almidón de 180 mg/l. Las concentraciones finales de las soluciones en los matraces equivalen a 0, 50, 100, 200, 300, 400 y 500 mg de almidón por kg de azúcar. A cada uno de los siete matraces añadir, utilizando una pipeta graduada, 10.0, 9.0, 8.0, 6.0, 4.0, 2.0 ml y 0 ml de agua destilada, para obtener un volumen de 10.0 ml en cada matraz y agitar mediante rotación hasta disolver todo el azúcar. 5.1. En cada matraz se adiciona, utilizando un dispensador automático o una pipeta 15.0 ± 0.1 ml de la solución de cloruro de calcio-ácido acético y mezclar bien por rotación. Se colocan los matraces en un baño (antes de los 30 min después de haber añadido el agua para disolver el azúcar) de agua a 95–100° C durante 15 ± 1 min. El tiempo se mide desde el instante en que el matraz se introduce en el

baño. Para facilitar la disolución del almidón se recomienda agitar los matraces por rotación a los 5 y 10 min después de colocados en el baño. Transcurridos los 15 min., se sacan los matraces del baño y enfriar con agua corriente hasta temperatura ambiental. Añadir, a cada matraz, 15.00 ± 0.05 ml de ácido acético 0.033 mol/l con una pipeta o un dispensador automático. Homogenizar.

Desarrollo del color y medición de la absorbancia: Utilizar agua destilada y determinar la corrección de un par de cubetas de no menos de 2 cm. A cada uno de los siete matraces adicionarles 5.0 ml de solución de yodato de potasio y 0.50 ml de solución de yoduro de potasio utilizando pipetas graduadas o un dispensador automático. Mezclar bien, enrasarlos con agua y homogeneizarlos. Enjuagar una de las cubetas dos veces con cada solución y llenarlas. Leer la absorbancia (entre los 20-60 min posteriores a la adición de la solución de yoduro de potasio) a 700 nm utilizando agua destilada como referencia. Si existe alguna corrección al homologar las cubetas corrija las lecturas de absorbancia hasta 0.001 unidades y anótelas.

Preparación de las soluciones de ensayo y del blanco-muestra: Depositar 3.60 ± 0.02 g de azúcar crudo en cada uno de los dos matraces de 50 ml, con un dispensador automático o una pipeta, adicionar en cada matraz 10.0 ± 0.1 ml de agua destilada, disolver el azúcar rotando el matraz y prosiga exactamente igual que 5.1 después de disolver el azúcar. Una vez adicionado el ácido acético enrasar el blanco-muestra con agua destilada y homogenizar. Al otro (solución de ensayo) añada 5.0 ml de la solución de yodato de potasio, 0.5 ml de la solución de yoduro de potasio y enrase con agua destilada. Tapar el matraz y homogenizar. Leer la absorbancia de la solución con una precisión de 0.001 unidades, en cubetas de 2 cm a 700 nm utilizando el blanco-muestra como referencia.

2.2.3 Determinación de las curvas de calibración para determinar almidón en jugo y azúcar crudo

Para la confección de las curvas de calibración de las técnicas de determinación de almidón en jugo de caña y en azúcar crudo se desarrollan 6 y 7 corridas respectivamente, con una concentración de almidón diferente para

cada corrida y luego se realiza una sola lectura de absorbancia para cada concentración.

En la tabla 2.1 y 2.2 se presentan los datos necesarios para la confección de las curvas de calibración.

Tabla 2.1. Datos para la curva de calibración para determinar la concentración de almidón presente en el jugo de caña.

Corrida	Alícuotas de la solución de referencia de almidón(mL)	Concentración de almidón (mg/mL)	Absorbancia (nm)
1	0.0	0.0	
2	1.0	0.8	
3	2.0	1.6	
4	3.0	2.4	
5	4.0	3.4	
6	5.0	4.0	

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2.2. Datos para la curva de calibración para determinar la concentración de almidón presente en el azúcar crudo.

Corrida	Alícuotas de la solución de referencia de almidón de 180mg/L (mL)	Concentración de almidón (mg/kg)	Absorbancia (nm)
1	0.0	0	
2	1.0	50	
3	2.0	100	
4	4.0	200	
5	6.0	300	
6	8.0	400	
7	10.0	500	

Fuente: Elaboración propia

2.2.4 Procedimiento para la validación de las curvas de calibración

Según Sargent (2009), los modelos matemáticos se desarrollan para pronosticar o adoptar decisiones mediante la información que brindan los

mismos. La toma de decisiones o el pronóstico de un proceso sobre la base de resultados que no se corrigen trae consigo graves consecuencias. Razón de esto, para definir que el modelo se puede utilizar, tiene que validarse.

La validación del modelo se define como "la prueba de que un modelo dentro de su dominio de aplicabilidad posea un satisfactorio intervalo de exactitud compatible con la aplicación prevista del modelo" (Schlesinger, 1979).

Para validar las curvas de calibración se aplica el método de regresión lineal, el cual permite encontrar el modelo que mejor se ajusta a los datos. Este caso encuentra una relación funcional de forma lineal $y=mx +n$.

Los coeficientes que permiten analizar la validez del modelo son: coeficiente de correlación, el P-value y por último, es necesario el cálculo del error relativo para buscar la calidad del ajuste. Para realizar la validación se emplea el programa Statgraphics.

Estadísticamente el Coeficiente de correlación de Pearson (r) es un índice que mide la relación lineal entre dos variables aleatorias cuantitativas. Es independiente de la escala de medida de las variables. El valor del coeficiente de correlación oscila entre -1 y 1 ($-1 \leq r \leq 1$). En cada caso concreto, el valor de r indica la "fortaleza" de la relación lineal entre las variables x e y . Cuando $|r|$ es próximo a 1 , la correlación es fuerte, lo que significa que las variaciones de una de las variables repercuten fuertemente en la otra. Mientras que si $|r|$ es próximo a 0 , la correlación es muy débil y las variables están muy poco relacionadas.

El valor de P-value debe ser menor de $0,05$ de acuerdo con el nivel de confianza que se trabaja, para que exista una relación estadística significativa. El error se estima por la diferencia entre los resultados obtenidos por el modelo y los datos de referencia, esto permite definir la calidad de predicción del modelo (Alonso 2017)

El cálculo del error relativo permite validar el modelo si este es menor que 5% y se determina por la ecuación 2.1 según Jiménez (2014):

$$Erel = \frac{x_{referencia} - x_{calculada}}{x_{referencia}} * 100 \quad (2.1)$$

Dónde:

E rel: error relativo.

x referencia: Valor de referencia

x calculado: Valor calculado por el modelo

Se tomó para el cálculo de la variable calculada un punto de la data de valores experimentales (X; Y), donde X es el valor de absorbancia medida y Y es la concentración de almidón correspondiente a esa absorbancia. La variable de referencia es la Y del punto que se selecciona. Para obtener la variable Y calculada se sustituye la variable X del punto en la ecuación del modelo.

2.3 Procedimiento para analizar el comportamiento del almidón en el proceso de producción de azúcar crudo

El análisis de comportamiento de almidón se realiza en cada una de las etapas del proceso. Para ello, se confeccionan gráficos de barras con los contenidos de almidón en ppm correspondientes a cada corriente y a partir de ellos se establecen los análisis en las etapas de extracción, purificación, evaporación y cristalización.

2.3.1 Comportamiento en la etapa de extracción y molienda

En esta etapa se comparan las concentraciones de almidón de las corrientes de jugo primario, jugo diluido y jugo mezclado y se analizan gráficamente dichas corrientes.

2.3.2 Comportamiento en la etapa de purificación

En la etapa de purificación se analizan los contenidos de almidón en las corrientes de jugo mezclado, jugo alcalizado, jugo clarificado y jugo filtrado. Esta primera corriente se incorpora al análisis del gráfico para determinar que ocurre con el contenido de almidón de la etapa de molienda a la etapa de purificación.

2.3.2.1 Determinación del porcentaje de remoción de almidón en la etapa de clarificación

Para estudiar el efecto que provoca el proceso de clarificación en el contenido de almidón, se procede a determinar el porcentaje que representa el almidón que se removió en la etapa; para su determinación se utiliza la ecuación 2.2:

$$\%Remoción = \frac{C \text{ almidón que entra} - C \text{ almidón que sale}}{C \text{ almidón que entra}} * 100 \quad (2.2)$$

Donde:

% Remoción: Porcentaje de almidón que se remueve en la clarificación.

C almidón que entra: Concentración de almidón que entra en el jugo mezclado (ppm)

C almidón que sale: Concentración de almidón que sale en el jugo clarificado (ppm)

2.3.3 Comportamiento en las etapas de evaporación-cristalización

En esta etapa, se analizan los contenidos de almidón en las corrientes de meladura, miel A, miel B y azúcar. También se incorpora un gráfico para ver el comportamiento de estas corrientes.

2.3.3.1 Determinación del porcentaje de retención de almidón en azúcar crudo

El porcentaje de retención de almidón en azúcar crudo se determina con el objetivo de saber cuánto representa la cantidad de almidón que se queda en el cristal de azúcar, de la cantidad de almidón que entra al proceso; para ello se utilizan las ecuaciones 2.3 y 2.4:

$$\% \text{ Retención de almidón en azúcar crudo} = \frac{FA \text{ azúcar crudo}}{FA JM} * 100 \quad (2.3)$$

Donde:

FA azúcar crudo: Flujo de almidón en azúcar crudo (Kg/h). Este valor se calcula por la ecuación 2.5:

$$FA \text{ azúcar crudo} = CA * Flujo \text{ de azúcar} \quad (2.4)$$

CA: Concentración de almidón e azúcar crudo (mg/Kg)

Flujo de azúcar: Flujo de azúcar producida (Kg/h). Este valor se obtiene de los valores de flujo de las corrientes mediante la metodología de los balances de masa expuestas en el epígrafe 2.4.2.1.

FA JM: Flujo de almidón en jugo mezclado (Kg/h). Para obtener este valor se aplica la ecuación 2.5 para flujos de almidón:

$$FA = q * CA \quad (2.5)$$

Donde:

FA : Flujo de almidón presente en cada corriente de jugo (Kg/h)

CA : Concentración de almidón en la corriente de jugo (ppm)

q : Flujo volumétrico del jugo (m^3/h). Se calcula por la ecuación 2.6:

$$q = \frac{F}{\rho} \quad (2.6)$$

Donde:

F : Flujo de la corriente de jugo en (Kg/h). Estos valores de flujo de las corrientes se obtienen mediante la metodología de los balances de masa expuestas en el epígrafe 2.4.2.1.

ρ : Densidad del jugo (ton/m^3). Este valor se busca en función del Brix de la solución, en la Tabla 6 del anexo 6 (Carrazana, 1987).

2.4 Determinación del efecto del almidón en el consumo de vapor del proceso

El estudio de la influencia del almidón en el consumo de vapor, se establece en las etapas de purificación y evaporación del proceso. Con respecto a ello se procede a determinar si existe correlación entre los siguientes parámetros:

- 1) Consumo de vapor en el calentador 1, 2 y 3 (rectificador) con respecto al flujo de almidón en jugo mezclado y jugo filtrado.
- 2) Consumo de vapor en el calentador de jugo clarificado, preevaporadores y el múltiple efecto en relación con el flujo de almidón en jugo clarificado.

El análisis de correlación permite establecer el grado de relación entre dos o más variables, lo que es muy útil cuando el interés se centra en la búsqueda de las variables que correlacionan con una variable determinada. Para determinar las correlaciones se realiza un análisis de regresión, para lo cual se utiliza el *software Statgraphics version 5.0*. Los parámetros determinantes que se analizan son el coeficiente de correlación y el *P-value*. El coeficiente de correlación expresa el grado de ajuste de la recta a los puntos experimentales, el cual es mejor en la medida que el coeficiente de correlación tiende a 1 y peor cuando tiende a 0. El valor de *P-value* debe ser menor de 0,05 para que exista una relación estadística significativa.

2.4.1 Metodología para determinar el consumo de vapor en el proceso

Para establecer el consumo de vapor en el proceso, es necesario aplicar la metodología para realizar el balance de masa y energía en los calentadores, preevaporadores y múltiple efecto, los datos a utilizar para la realización de los cálculos se muestran en el anexo 2.

2.4.1.1 Balances de masa en el proceso

En este epígrafe se muestran los balances de masa correspondientes a las etapas de extracción, molienda, purificación y cristalización, para conocer los valores de flujos necesarios y desarrollar los cálculos que se realizan a lo largo del estudio.

Balances de masa en la etapa de extracción

Se realiza un balance general (ecuación 2.7) correspondiente a la etapa (Figura 2.3):

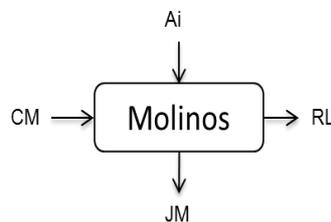


Figura 2.3. Diagrama de la etapa de extracción y molienda.

$$CM + Ai = JM + B \quad (2.7)$$

Donde:

CM: flujo de caña molida (t/h).

Ai: flujo de agua de imbibición (t/h).

B: flujo de bagazo (t/h).

JM: flujo de jugo mezclado (t/h).

Se realiza un balance por componente a partir de la fibra para determinar el flujo de bagazo que sale de los molinos, se tiene en cuenta que el jugo mezclado y el agua de imbibición no contienen fibra en caña.

Balance por componente a partir de la fibra:

$$\%F_{CM} \cdot CM = \%F_B \cdot B \quad (2.8)$$

Donde:

$\%F_{CM}$: % Fibra en caña molida.

$\%F_B$: % Fibra en bagazo

El valor de la fibra en bagazo se determina por la ecuación 2.9:

$$\text{Humedad de bagazo} + F_B + \text{Brix } B = 100\% \quad (2.9)$$

Donde:

Humedad de bagazo : Porcentaje humedad en bagazo (%).

Brix B : Brix en bagazo (°Bx).

Se despeja de la ecuación 2.8 el flujo de bagazo:

$$B = \frac{\%F_{CM} \cdot CM}{\%F_B} \quad (2.10)$$

Con los flujos calculados anteriormente se despeja en la ecuación 2.7 para obtener el valor del flujo del jugo mezclado.

$$JM = CM + Ai - B \quad (2.11)$$

Balances de masa en la etapa de purificación

En la figura 2.4 se muestra el diagrama de la etapa de purificación para realizar el balance de masa:

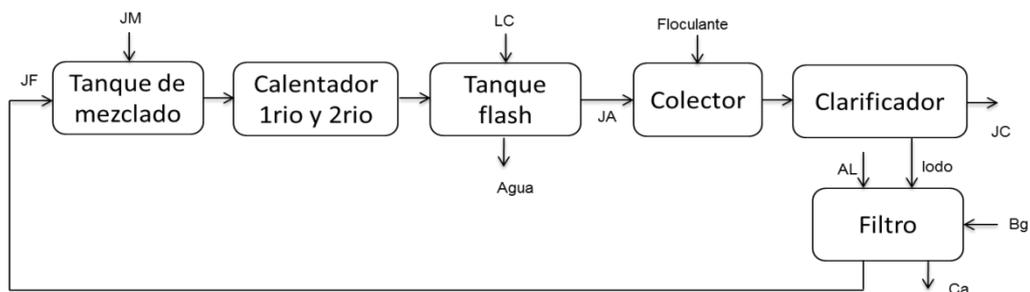


Figura 2.4. Diagrama de la etapa de purificación.

Balance de masa en la subetapa de alcalización

Esta subetapa comprende el tanque de mezclado, los calentadores y el tanque flash, donde el agua que se evapora en este último se desprecia (Figura 2.5).

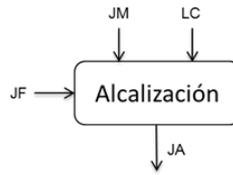


Figura 2.5. Diagrama del proceso de alcalización.

Balance general en la subetapa de alcalización:

$$JM+LC+JF=JA \quad (2.12)$$

Donde:

LC: flujo de lechada de cal (t/h).

JF: flujo de jugo filtrado (t/h).

JA: flujo de jugo alcalizado (t/h).

Se tienen tres incógnitas, ya que solo se conoce el valor del flujo del jugo mezclado, por lo que se necesitan dos ecuaciones más para dar solución a este sistema. Se realizan los balances por componente a partir del Brix y los insolubles.

Balance por componente a partir del Brix.

$$JM \cdot Bx_{JM} + LC \cdot Bx_{LC} + JF \cdot Bx_{JF} = JA \cdot Bx_{JA} \quad (2.13)$$

Balance por componente a partir de los insolubles.

$$JM \cdot I_{JM} + JF \cdot I_{JF} = JA \cdot I_{JA} \quad (2.14)$$

El valor de los insolubles en la lechada de cal se deprecia.

Se despejan las ecuaciones 2.12, 2.13 y 2.14 dejándolas en función del jugo filtrado.

$$JF = \frac{JM \cdot \left(\frac{I_{JM}}{I_{JA}} - \frac{Bx_{JM} - Bx_{LC}}{Bx_{JA} - Bx_{LC}} \right)}{\left(\frac{Bx_{JF} - Bx_{LC}}{Bx_{JA} - Bx_{LC}} - \frac{I_{JF}}{I_{JA}} \right)} \quad (2.15)$$

Para obtener el valor de flujo del jugo alcalizado, se despeja de la ecuación 2.14.

$$JA = \frac{JM \cdot I_{JM} + JF \cdot I_{JF}}{I_{JA}} \quad (2.16)$$

El flujo de lechada de cal se obtiene de la ecuación 2.12

$$LC = JA - JF - JM \quad (2.17)$$

Balance de masa en el clarificador

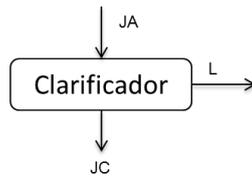


Figura 2.6. Diagrama del proceso de clarificación.

Balance general en el clarificador.

$$J_A = J_C + L \quad (2.18)$$

Donde:

J_C: flujo de jugo clarificado (t/h).

L: flujo de lodo (t/h).

Balance por componentes a partir de los insolubles.

$$I_{JA} \cdot J_A = I_{JC} \cdot J_C + I_L \cdot L \quad (2.19)$$

Donde:

I_{JC}: insolubles en el jugo clarificado (%).

I_L: insolubles en los lodos (%).

Se despeja de la ecuación 2.18 el flujo de jugo clarificado y se sustituye en la 2.19, de la cual se despeja el flujo de lodo.

$$L = J_A \cdot \left(\frac{I_{JA} - I_{JC}}{I_L - I_{JC}} \right) \quad (2.20)$$

El flujo de jugo clarificado se obtiene de la ecuación 2.18

$$J_C = J_A - L \quad (2.21)$$

Balance de masa en la etapa general de purificación

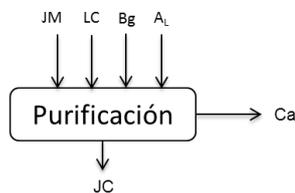


Figura 2.7. Diagrama general del proceso de purificación.

Balance general en purificación.

$$J_M + L_C + B_g + A_L = J_C + C_a \quad (2.22)$$

Donde:

B_g: flujo de bagacillo (t/h).

A_L: flujo de agua de lavado (t/h).

Ca: flujo de cachaza (t/h).

Balance por componentes a partir del Brix.

$$Bx_{JM} \cdot JM + Bx_{LC} \cdot LC + Bx_{Bg} \cdot Bg = Bx_{JC} \cdot JC + Bx_{Ca} \cdot Ca \quad (2.23)$$

Donde:

Bx_{JC} : Brix del jugo clarificado (°Bx).

Bx_{Bg} : Brix del bagacillo (°Bx).

Bx_{Ca} : Brix de la cachaza (°Bx).

Balance por componentes a partir de los insolubles.

$$I_{JM} \cdot JM + I_{Bg} \cdot Bg = I_{JC} \cdot JC + I_{Ca} \cdot Ca \quad (2.24)$$

Donde:

I_{Bg} : Insolubles en el bagacillo (%).

I_{Ca} : Insolubles en la cachaza (%).

Se despejan las ecuaciones 2.23 y 2.24 dejándolas en función del flujo de cachaza.

$$Ca = \frac{JC \cdot \left(\frac{Bx_{JC}}{Bx_{Bg}} - \frac{I_{JC}}{I_{Bg}} \right) + JM \cdot \left(\frac{I_{JM}}{I_{Bg}} - \frac{Bx_{JM}}{Bx_{Bg}} \right) - LC \cdot \left(\frac{Bx_{LC}}{Bx_{Bg}} \right)}{\left(\frac{I_{Ca}}{I_{Bg}} - \frac{Bx_{Ca}}{Bx_{Bg}} \right)} \quad (2.25)$$

Como el bagacillo tiene la misma composición que el bagazo, se puede considerar que los insolubles presentes en el bagacillo son numéricamente iguales al % de fibra en caña que contiene el bagazo. El mismo se compone por fibra (%F), agua (Hdad) y sólidos solubles (°Bx).

$$100\%Bg = \%F_{RL} + Hdad_{Bg} + Bx_{Bg} \quad (2.26)$$

Se despeja de la ecuación 2.26 y se obtiene el Brix del bagacillo.

$$Bx_{Bg} = 100 - \%F_{RL} - Hdad_{Bg} \quad (2.27)$$

La cachaza se encuentra compuesta por fibra (I_{Ca}), agua (Hdad) y sólidos solubles (°Bx).

$$100\%Ca = I_{Ca} + Hdad_{Ca} + Bx_{Ca} \quad (2.28)$$

Se despeja de la ecuación 2.28 y se obtienen los insolubles de la cachaza.

$$I_{Ca} = 100 - Hdad_{Ca} - Bx_{Ca} \quad (2.29)$$

El Brix de la cachaza se puede obtener mediante la ecuación 2.30.

$$Bx_{Ca} = \frac{Hdad_{Ca} \cdot Bx_{\text{jugo extraído a la cachaza}}}{100 - Bx_{\text{jugo extraído a la cachaza}}} \quad (2.30)$$

Al despejar la ecuación 2.24 se obtiene el flujo de bagacillo.

$$Bg = \frac{I_{JC} \cdot JC + I_{Ca} \cdot Ca - I_{JM} \cdot JM}{I_{Bg}} \quad (2.31)$$

Con el valor de los flujos determinados anteriormente, se puede calcular el flujo de agua de lavado mediante la ecuación 2.22.

$$Al = JC + Ca - JM - LC - Bg \quad (2.32)$$

Balances de masa en la etapa de evaporación

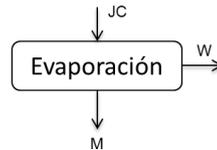


Figura 2.8. Diagrama de la etapa de evaporación.

El objetivo del balance de masa en esta etapa es determinar el flujo de meladura, para lo cual es necesario realizar un balance general y uno por componentes.

Balance de masa general:

$$JC = M + W \quad (2.33)$$

Donde:

M: flujo de meladura (t/h).

W: flujo de agua evaporada (t/h).

Balance por componentes a partir del Brix:

$$Bx_{JC} \cdot JC = Bx_M \cdot M \quad (2.34)$$

Donde:

Bx_M : Brix de la meladura ($^{\circ}Bx$).

Los grados Brix del agua evaporada se desprecian.

Se despeja de la ecuación 2.34 el flujo de meladura.

$$M = \frac{Bx_{JC} \cdot JC}{Bx_M} \quad (2.35)$$

Balance de masa en la etapa de cristalización

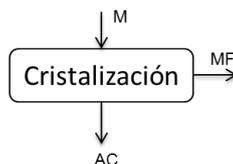


Figura 2.9. Diagrama de la etapa de cristalización.

Para determinar los flujos que abandonan la etapa de cristalización, se utiliza el método de Cobenze, que relaciona las purzas de las corrientes que entran y salen de la etapa.

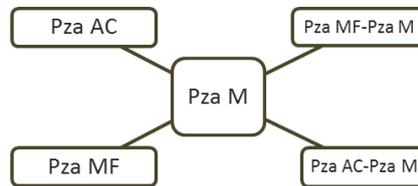


Figura 2.10. Procedimiento de la Cruz de Cobenze.

Donde:

Pza AC: pureza del azúcar crudo (%).

Pza MF: pureza de la miel final (%).

Pza M: pureza de la meladura (%).

La suma de ambas diferencias constituye el total de sólidos.

La relación entre la diferencia de purzas de la miel final y la meladura, y el total de sólidos, constituyen la fracción de sólidos presentes en la meladura que fueron a parar al azúcar crudo. El mismo análisis se realiza para la miel final.

Para determinar la pureza de la meladura y del azúcar crudo se precede de la siguiente forma.

$$Pza_M = \frac{Pol_M}{Bx_M} \cdot 100 \quad (2.36)$$

$$Pza_{AC} = \frac{Pol_{AC}}{Bx_{AC}} \cdot 100 \quad (2.37)$$

La pureza de la miel final se encuentra en las hojas de análisis del central.

Para calcular el flujo de azúcar crudo (AC) y miel final (MF) es necesario determinar la masa de sólidos presentes en la meladura, en el azúcar crudo y en la miel final.

$$\text{Masa de sólidos en M} = \frac{M \cdot Bx_M}{100} \quad (2.38)$$

$$\text{Masa de sólidos en AC} = \frac{\text{Masa de sólidos en M} \cdot \text{fracción de sólidos en AC}}{100} \quad (2.39)$$

$$\text{Masa de sólidos en MF} = \frac{\text{Masa de sólidos en M} \cdot \text{fracción de sólidos en MF}}{100} \quad (2.40)$$

$$AC = \frac{\text{Masa de sólidos en AC}}{Bx_{AC}} \cdot 100 \quad (2.41)$$

$$MF = \frac{\text{Masa de sólidos en MF}}{Bx_{MF}} \cdot 100 \quad (2.42)$$

2.4.1.2 Balances de energía en el proceso

En este epígrafe se desarrolla la metodología correspondiente a los balances de energía para determinar el flujo de vapor que se consume en calentadores, preevaporador y múltiple efecto, equipos presentes en el proceso.

Balance de energía en los calentadores

En el proceso objeto estudio, se cuenta con calentadores primarios, secundarios, rectificadores y un calentador de jugo clarificado. Los calentadores primarios reciben vapor del segundo vaso del cuádruple, los secundarios y rectificadores son alimentados con vapor del preevaporador y el calentador de jugo clarificado con vapor de escape proveniente de los turbogeneradores.

$$Q_{ced} = Q_{abs} + Q_{perd} \quad (2.43)$$

$$D_{cal} \cdot \lambda_{vap} = X \cdot JA \cdot Cp_{JA} \cdot \Delta T \quad (2.44)$$

Donde:

D_{cal} : Consumo de vapor en calentadores (kg vapor/t CM).

λ_{vap} : Calor latente del vapor de escape a la presión de saturación (tabla 2 de Keenan).

Cp_{JA} : Capacidad calorífica del jugo alcalizado (kcal/kg °C).

ΔT : Diferencia de temperatura del jugo alcalizado (°C).

X: (Se considera de 1,02 a 1,08). Se toma el valor de 1,04.

Se despeja de la ecuación 2.44 el consumo de vapor.

$$D_{cal} = \frac{X \cdot JA \cdot Cp_{JA} \cdot \Delta T}{\lambda_{vap}} \quad (2.45)$$

Según Hugot, 1987, la capacidad calorífica del jugo alcalizado se determina por la expresión:

$$Cp_{JA} = 1 - 0.0056 \cdot BX_{JA} \quad (2.46)$$

Diferencia de temperatura del jugo alcalizado.

$$\Delta T = T_s - T_e \quad (2.47)$$

Donde:

T_s : Temperatura de salida del jugo.

T_e : Temperatura de entrada del jugo.

Balance de energía en el pre-evaporador

Para conocer el flujo de agua evaporada en el preevaporador se realiza un balance de masa general y uno por componentes a partir del Brix.

Balance de masa general.

$$JC = W_1 + JC_C \quad (2.48)$$

Donde:

W_1 : Flujo de agua evaporada en el preevaporador (t/h).

JC_C : Flujo de jugo clarificado concentrado (t/h).

Balance de masa por componentes a partir del Brix.

$$Bx_{JC} \cdot JC = Bx_{JC_C} \cdot JC_C \quad (2.49)$$

Donde:

Bx_{JC_C} : Brix del jugo clarificado concentrado ($^{\circ}Bx$).

Se desprecia el Brix del agua evaporada.

Se combinan las ecuaciones 2.48 y 2.49 para obtener el flujo de agua evaporada en el preevaporador.

$$W_1 = JC \cdot \left(1 - \frac{Bx_{JC}}{Bx_{JC_C}}\right) \quad (2.50)$$

Para determinar el consumo de vapor se utiliza la expresión 2.51.

$$D_{pre} = \frac{JC \cdot C_{p_{JC}} \cdot (T_s - T_e) + W_1 \cdot \lambda_{v_{cu}}}{H_2 - H_1} \cdot 1,04 \quad (2.51)$$

Donde:

D_{pre} : Consumo de vapor en el preevaporador (kg vapor/t CM).

$C_{p_{JC}}$: Capacidad calorífica del jugo clarificado (kcal/kg $^{\circ}C$).

T_s : Temperatura de salida del jugo ($^{\circ}C$).

T_e : Temperatura de entrada del jugo ($^{\circ}C$).

$\lambda_{v_{cu}}$: Calor latente de vaporización del vapor vegetal (kcal/kg).

H_2 : Entalpía del vapor de escape (vapor sobrecalentado) (kcal/kg). Keenan, J. H. Tabla 3. Steam Tables. 1988.

H_1 : Entalpía del condensado de salida del preevaporador (kcal/kg). Keenan, J. H. Tabla 2. Steam Tables. 1988.

Para hallar la capacidad calorífica del jugo se utiliza la siguiente ecuación:

$$C_{p_{JC}} = 1 - 0.0056 \cdot Bx_{JC} \quad (2.52)$$

Para la temperatura de salida del jugo es necesario tener en cuenta la temperatura de saturación del mismo y la Elevación del Punto de Ebullición (EPE).

$$EPE = EPE_{\text{conc}} + EPE_{\text{hidrost}} + EPE_{\text{hidrod}} \quad (2.53)$$

Donde:

EPE_{conc} : Elevación del punto de ebullición debido a la concentración.

EPE_{hidrost} : Elevación del punto de ebullición debido a la presión hidrostática.

EPE_{hidrod} : Elevación del punto de ebullición debido al efecto hidrodinámico.

Para el cálculo de la elevación del punto de ebullición debido a la concentración se utiliza la Figura 2/3: Elevación del punto de ebullición de soluciones técnicas de sacarosa-agua, Bartens (1995), en función del Brix del jugo clarificado concentrado y la presión presente en el cuerpo del equipo.

La elevación del punto de ebullición debido a la presión hidrostática se puede determinar por la siguiente ecuación:

$$EPE_{\text{hidrost}} = T_m - T_s \quad (2.54)$$

Donde:

T_s : Temperatura de saturación del jugo. Keenan (1988), en función de la presión del cuerpo del equipo ($^{\circ}\text{C}$).

T_m : Temperatura de la capa media del líquido ($^{\circ}\text{C}$). Esta a su vez depende de la presión de la capa media del líquido, la cual se obtiene de la ecuación 2.55.

$$P_m = P_{\text{vcu}} + \Delta P_h \quad (2.55)$$

Donde:

P_{vcu} : Presión de vapor en el cuerpo (kgf/cm^2).

ΔP_h : caída de presión hidrostática, la cual se puede hallar por:

$$\Delta P_h = \rho \cdot g \cdot \Delta h \quad (2.56)$$

Donde:

ρ : Densidad de la solución (Kg/m^3). Figura 2/1: Densidad de soluciones sacarosa-agua, Bartens (1995), en función del Brix del jugo clarificado concentrado y la temperatura de saturación.

g : Aceleración de la gravedad ($9.8 \text{ m}/\text{s}^2$).

Δh : Altura del líquido en el tubo.

$$\Delta h = \frac{1}{3} \cdot h_{\text{calandria}} \quad (2.57)$$

$$\Delta h = 0.6\text{m.}$$

La elevación del punto de ebullición debido al efecto hidrodinámico se considera de 1 a 1,5 °C. Se escoge el valor de 1,3 °C.

Consumo de vapor en el múltiple efecto

En el cuádruple efecto se consume vapor solo en el primer vaso, este consumo se incrementa debido a las extracciones de vapor que se realizan para ser utilizado en otra etapa del proceso. En el caso de nuestro central, se realizan extracciones del segundo vaso para ser utilizado este vapor como agente de calentamiento en los calentadores primarios.

Es necesario realizar un balance de masa general y uno por componentes a partir del Brix para determinar el agua evaporada total en la estación (W_T).

Balance de masa general:

$$J_{C_C} = W_T + M \quad (2.58)$$

Balance por componentes a partir del Brix.

$$B_{x_{J_{C_C}}} \cdot J_{C_C} = B_{x_M} \cdot M \quad (2.59)$$

Se combinan ambas ecuaciones para determinar el flujo de agua evaporada total.

$$W_T = M \cdot \left(\frac{B_{x_M}}{B_{x_{J_{C_C}}}} - 1 \right) \quad (2.60)$$

Una vez determinado el flujo de agua evaporada en el cuádruple, el consumo de vapor con extracciones puede ser estimado mediante la ecuación siguiente:

$$D_{ME} = \frac{W_T}{n} + \frac{n-2}{n} \cdot E_2 \quad (2.61)$$

Donde:

D_{ME} : Consumo de vapor en el cuádruple efecto con extracciones (kg vapor/h).

n : Cantidad de vasos que posee la estación.

2: vaso del cual se realiza la extracción.

E_2 : Consumo de vapor en los calentadores primarios.

Para referir el consumo de vapor en el cuádruple efecto a caña molida (kgvapor/TCM)

$$D_{ME/CM} = \frac{D_{ME}}{CM} \quad (2.62)$$

2.5 Valoración económica

En este epígrafe se realiza una valoración económica con el fin de determinar el efecto que genera el incumplimiento de las normas que establecen los requisitos de la calidad del azúcar crudo, respecto al contenido de almidón presente en ella.

2.5.1 Normas de calidad del azúcar

Se realiza una consulta de las normas de calidad del azúcar crudo para obtener información de los requerimientos necesarios de calidad que debe cumplir el azúcar crudo de nuestro país con respecto al contenido de almidón, en la tabla 2.4 se muestran los valores máximos de contenido de almidón establecidos en las normas de calidad del azúcar.

Tabla 2.4. Valores máximos de contenido de almidón en azúcar establecidos en las normas de calidad.

<i>Normas de calidad</i>	<i>Contenido máximo de almidón (ppm)</i>
NRA 1:99 (Azúcar para exportación)	200
NRA X:0X (Azúcar de caña de alta pol)	150
NRA X:0X (Azúcar de caña estándar)	200
NC 85:2012 (Azúcar crudo)	350

Fuente: Elaboración propia.

Para analizar los resultados experimentales se toma como patrón de comparación 350 ppm de almidón en azúcar como valor máximo, establecido por la NC 85:2012.

También se analiza la Norma Cubana para azúcar crudo de exportación NRA 1:99, donde se especifica que el contenido máximo de dextrana que debe tener el azúcar crudo es de 350 ppm.

Además se realiza la consulta del artículo "Penalización y bonificación por los polisacáridos en azúcar crudo" del grupo empresarial AZCUBA (Instrucción 07:2014), el cual contempla la exigencia de los parámetros establecidos para el contenido de polisacáridos, para la comercialización internacional del azúcar crudo. En el artículo se expone la penalización y bonificación que se aplica en caso de cumplirse o no con los requisitos de calidad del azúcar crudo en lo que respecta al contenido de almidón presente en este producto.

2.6 Conclusiones Parciales

1. Se realiza la caracterización del proceso de producción de azúcar crudo de la UEB “Mario Muñoz Monroy”.
2. Se seleccionan las 10 corrientes de muestreo para determinar el comportamiento del contenido de almidón en el proceso.
3. Se seleccionan las técnicas experimentales C27 y C28 del Manual de métodos analíticos para azúcar crudo (MACU), las cuales se basan en el método espectrofotométrico para determinar el contenido de almidón.
4. Se utiliza la metodología del Pavlov (1981) para determinar el consumo de vapor de los calentadores, preevaporador y múltiple efecto, y estudiar la influencia del contenido de almidón en este parámetro.
5. Se plantea una valoración económica para ver la incidencia del almidón en el proceso en cuanto a la calidad del producto final.

Capítulo 3 Análisis de resultados

En este capítulo se comprueba el ajuste de las curvas de referencia, las cuales se obtienen mediante la aplicación de las técnicas analíticas para determinar el contenido de almidón en jugo de caña y azúcar crudo. Se determina el comportamiento del contenido de almidón en las corrientes del proceso y la influencia de este en las etapas, mediante correlaciones de los parámetros de calidad y operación. Además, se comprueba el porcentaje de remoción del almidón en la etapa de clarificación y se verifica el efecto del almidón en el consumo de vapor de los calentadores, preevaporadores y múltiple efecto. Se realiza una valoración económica para determinar el efecto económico que genera el incumplimiento del contenido de almidón en azúcar crudo que establecen las normas de calidad.

3.1 Curvas de referencia para obtener almidón en el proceso. Validación

Para validar las curvas de referencia se utiliza la información que se ofrece en el epígrafe 2.2.4, donde se determina la calidad del modelo que describe las curvas, mediante el cálculo del error relativo y de esta manera se verifica el ajuste del mismo para definir con precisión, el comportamiento del almidón en el proceso.

3.1.1 Curvas de referencia para determinar almidón en jugo de caña

En la figura 3.1 se muestra la curva de referencia para determinar almidón en jugo de caña.

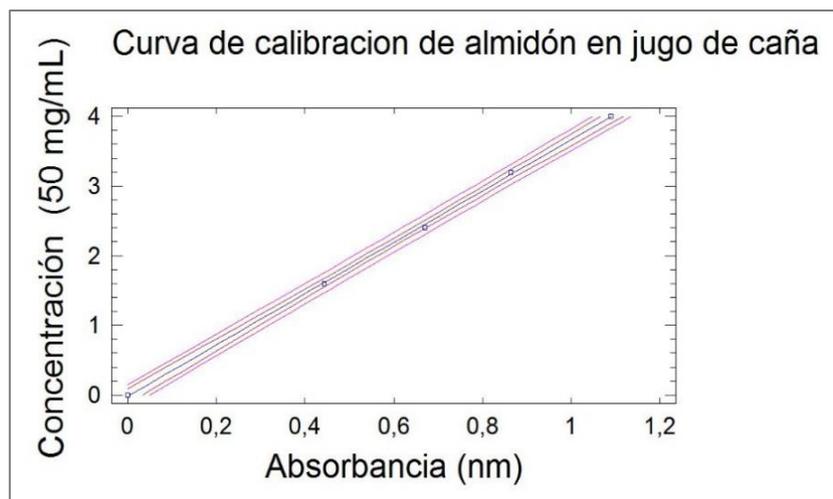


Figura 3.1. Curva de referencia para determinar almidón en jugo de caña.

La siguiente ecuación (3.1) describe el modelo que se ajusta a la curva de referencia para determinar almidón en jugo de caña:

$$y = -0,0210554 + 3,68706 \cdot x \quad (3.1)$$

Dónde:

y: Concentración de almidón en jugo (mg/50ml).

x: Absorbancia (nm).

3.1.2 Curva de referencia para determinar almidón en azúcar crudo

En la figura 3.2 se muestra la curva de referencia para determinar almidón en azúcar crudo

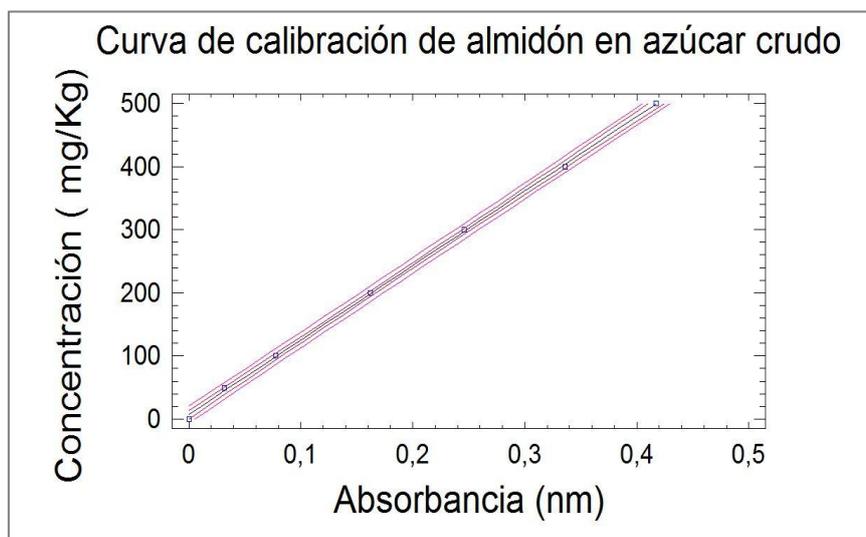


Figura 3.2. Curva de referencia de determinación de almidón en azúcar crudo.

La ecuación 3.2 es la que describe el modelo que se ajusta a la curva de referencia para determinar almidón en azúcar crudo:

$$y = 6,91873 + 1181,41 * x \quad (3.2)$$

Dónde:

y: Concentración de almidón en jugo (mg/kg).

x: Absorbancia (nm).

3.1.3 Análisis de la calidad de ajuste de los modelos de las curvas de referencias

En la tabla 3.1 se muestran los resultados obtenidos para verificar la calidad de ajuste de los modelos que describen las curvas de referencia, para determinar almidón en jugo de caña y azúcar crudo, respectivamente. La validez del modelo se comprueba mediante el análisis de tres parámetros estadísticos que se muestran a continuación.

Tabla 3.1. Parámetros estadísticos para validar la curva de referencia de determinación de almidón en jugo de caña y azúcar crudo.

Parámetros	Curva de almidón en jugo	Curva de almidón en azúcar crudo
<i>Coefficiente de Correlación</i>	0.99	0.99
<i>P-value</i>	0.00	0.00
<i>Error relativo (%)</i>	0.04	4.48

Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar en la tabla 3.1, los valores de coeficientes de correlación para ambas curvas son muy cercanos a la unidad, por lo que existe dependencia lineal favorable entre las variables y por tanto, es más exacta la predicción. El *P-value* para ambas curvas es menor que 0,05 con un nivel de confianza de un 99%, lo que también indica la existencia de una relación estadística significativa entre las variables. Los valores del error relativo de las dos curvas son menores que 5%, por lo tanto, con los resultados obtenidos se confirma el ajuste y la validez de los modelos, lo que permite su utilización para

determinar el contenido de almidón en las corrientes seleccionadas mediante la técnica empleada.

Los resultados de absorbancia que se obtienen en la determinación de almidón en jugo y azúcar crudo se muestran en el anexo 3.

3.2 Comportamiento del almidón en el proceso de producción de azúcar crudo

La evaluación del comportamiento del almidón a lo largo del proceso, se realiza durante 10 días con tres réplicas en los puntos que se establecen (Figura 2.2 del epígrafe 2.2); a partir de las técnicas analíticas correspondientes a jugo y azúcar crudo. Se determina la absorbancia en las muestras y se busca el contenido de almidón mediante las curvas de referencia (epígrafe 3.1); los valores de absorbancia se presentan en el anexo 4. Se aplican técnicas estadísticas para facilitar el estudio y la comprensión de los resultados.

3.2.1 Caracterización estadística de la concentración de almidón en las corrientes del proceso

En la determinación del comportamiento de almidón en el proceso se someten los resultados expuestos en el anexo 5 a una caracterización estadística, con el objetivo de comprobar la veracidad de los mismos.

El análisis se muestra en el anexo 6, los valores de los coeficientes de *skewness* y *kurtosis* reflejan que las concentraciones de almidón en cada corriente tienen una distribución normal. Por lo tanto, se comprueba la veracidad de los resultados para ser utilizados en otros análisis correspondientes.

3.2.2 Mapa del contenido de almidón en el proceso

El mapa permite visualizar el comportamiento del almidón en ppm, en el proceso de producción de azúcar crudo, además se establece con la proyección del mismo el diagrama de flujo del proceso que se muestra en la figura 3.3. Este mapa se elabora a partir de los valores medios de

concentración de almidón que se obtienen en cada corriente durante los 10 días en estudio.

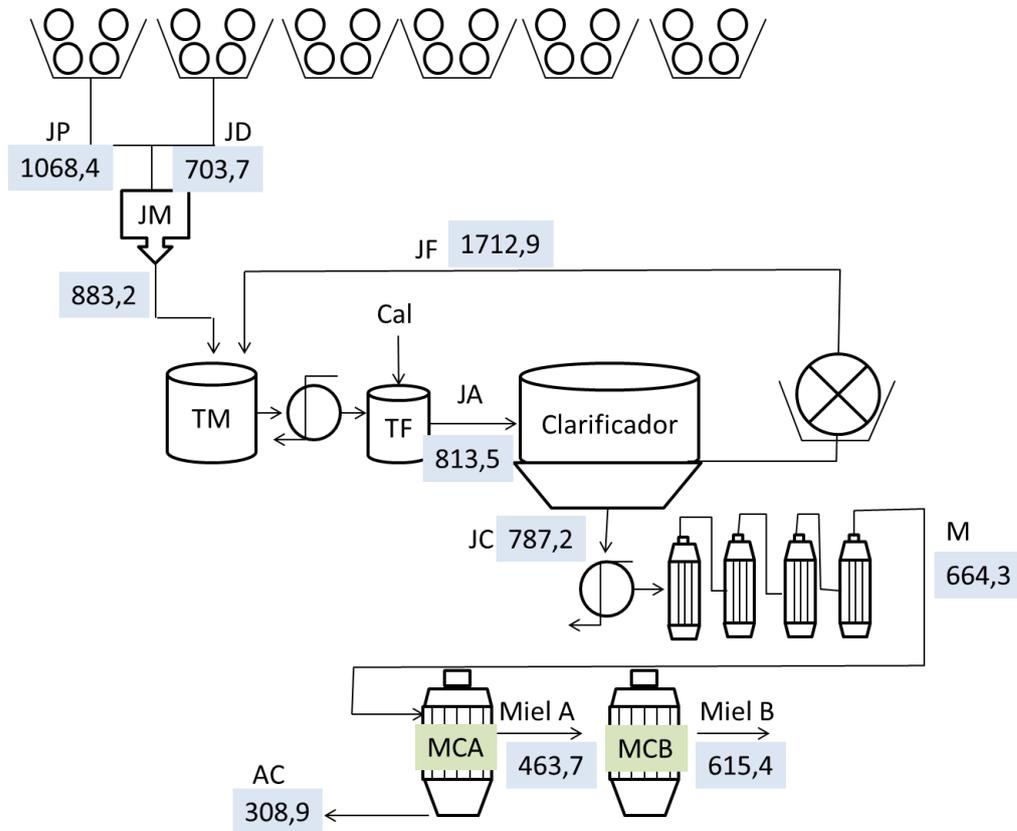


Figura 3.3: Mapa del contenido de almidón en el proceso

Se comprueba que el almidón viene junto a la caña de azúcar, se extrae con el jugo en la molienda y entra a la etapa de purificación en el jugo mezclado. En la etapa de purificación una parte del almidón se elimina en la sedimentación y la otra sigue en el proceso, pasa a la etapa de evaporación y luego, a la de cristalización. En la cristalización, parte de esta impureza se separa en la miel B, pero queda aún una porción de almidón en el producto final, este análisis demuestra lo planteado por Zhou *et al.* (2008).

3.3 Influencia del contenido de almidón en las etapas del proceso

Con el objetivo de realizar un análisis de mayor profundidad sobre el comportamiento del almidón en el proceso, se establece su estudio en las etapas de extracción, purificación, evaporación y cristalización.

3.3.1 Comportamiento del almidón en la etapa de extracción y molienda

En el estudio del comportamiento del almidón en la etapa de extracción y molienda se tienen en cuenta la concentración de almidón presente en las corrientes de jugo primario, jugo diluido y jugo mezclado; en la tabla 3.3 se muestra la caracterización estadística de dichos resultados para realizar el análisis.

Tabla 3.3. Concentración de almidón en las corrientes de la etapa de extracción y molienda.

<i>Experimentos</i>	<i>Concentración de almidón (mg/L)</i>		
	<i>Jugo Primario</i>	<i>Jugo Diluido</i>	<i>Jugo Mezclado</i>
1	1628,69	572,09	649,46
2	722,36	574,34	790,03
3	1323,73	1175,03	828,68
4	432,51	644,31	925,40
5	332,63	260,98	693,15
6	836,38	833,20	1074,00
7	1781,33	569,21	791,26
8	1568,98	908,54	1066,75
9	1224,58	908,31	1015,75
10	832,72	591,42	997,88
<i>Media</i>	1068,39	703,74	883,24
<i>Coefficiente de variación (%)</i>	509,59	255,39	154,00

Fuente: Elaboración propia

Según los valores reportados en la tabla 3.3 la concentración de almidón en las corrientes posee un alto coeficiente de variación, el cual es mucho mayor que un 12%, por lo que se puede concluir que la media no es representativa de la población. Este fenómeno ocurre por la variación del contenido de almidón que entra al proceso, que depende de las características y de la variedad de la

caña; en el proceso objeto de estudio, la caña que se procesa proviene de diferentes lugares de cosecha lo que influye en gran medida en la diversidad de materia prima que se usa en la etapa de extracción y molienda. En este sentido se toman en cuenta los criterios de los autores Godshall et al. (1990), Zossi et al. (2011), Figueira et al. (2011), Castro (2015) y Jimenez et al. (2016), los cuales plantean que la concentración de almidón varía en gran medida a merced de la variedad de la caña y estado de deterioro y de madurez, criterio al cual se suma Alonso (2017) que establece que la caña verde contiene cantidades significativas de hojas, por lo cual se incrementa la cantidad de no azúcares que ingresa a fábrica, especialmente almidón. Según Penados (2004), Godshall (2004) y Zossi et al. (2008) con la incorporación de la cosecha mecanizada aumenta el contenido de polisacáridos que entran al proceso y dentro de ellos el almidón, esto se debe a la cantidad de materia extraña y demás compuestos orgánicos que se incorporan a la fábrica junto con la caña. En la figura 3.4 se muestran los valores de concentración de almidón en las tres corrientes que se analizan en la etapa de extracción y molienda.

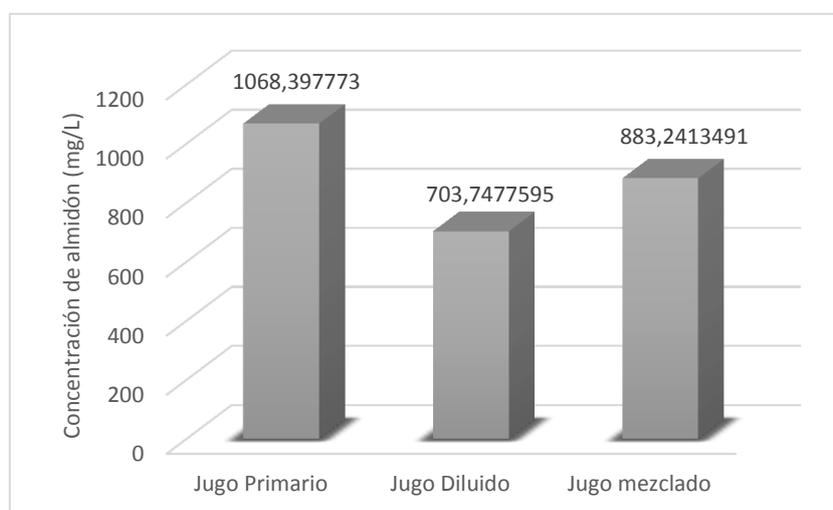


Figura 3.4. Comportamiento del almidón en la etapa de extracción y molienda.

Como se puede apreciar en la Figura 3.4 la mayor parte del almidón en esta etapa se encuentra en el jugo primario, esto se debe a que este jugo proviene del primer molino en el cual entra gran cantidad de materia extraña, cogollo y otras impurezas que garantizan en gran parte la presencia del almidón. Según Larrahondo (1995) el cogollo representa la principal fuente de entrada de

almidón al proceso y Zhou *et al.* (2008) plantea que el almidón se extrae en el tándem de molino por la propia molienda.

El jugo diluido reporta menores valores de concentración de almidón que el jugo primario, en contradicción con el criterio de investigadores como Jenkins (1971), Godshall *et al.* (1991) y Alonso (2017), los cuales informan que en los jugos fríos el almidón no es soluble, pero en el proceso de maceración al añadir agua de imbibición a consecuencia de las altas temperaturas hacen que estos gránulos se gelatinicen, lo que incrementa la solubilidad en dicho jugo y trae consigo una mayor extracción del contenido de almidón. Sin embargo, esta discrepancia con la bibliografía se debe a que en el central analizado el flujo del jugo primario es mucho mayor en cantidad de flujo que el del jugo diluido.

El contenido de almidón en el jugo mezclado se encuentra en menor cantidad que en el jugo primario, también por la diferencia existente en cuanto a cantidades de flujo se refiere, ya que la corriente de jugo diluido es menor que la corriente de jugo primario, las cuales se mezclan para formar la corriente de jugo mezclado. Según Boyes (1960), se obtienen valores de concentración de almidón en jugo mezclado como máximo de 595 mg/L, lo cual no coincide con los resultados obtenidos en el estudio; en este caso se encuentran en mayor cantidad como consecuencia de la variedad de la caña y el contenido de materia extraña que entra mayormente al proceso por las hojas y cogollos de la caña.

Según Zossi *et al.* (2011) en dependencia de la variedad de caña, el contenido de almidón en los jugos puede variar normalmente desde 200 a 1200 mg/L, lo que otorga validez a los resultados que se obtienen experimentalmente en esta etapa y que reporta valores que se encuentran en un rango de 700-1100 mg/L.

3.3.2 Comportamiento del almidón en la etapa de purificación

En la tabla 3.4 se muestran los valores de concentración de almidón de las corrientes de jugo mezclado, jugo clarificado y jugo filtrado, para los 10 días de estudio con la caracterización estadística correspondiente.

Tabla 3.4. Valores de concentración de almidón en las corrientes de la etapa de purificación.

Experimentos	Concentración de almidón (mg/L)			
	Jugo Mezclado	Jugo Alcalizado	Jugo Clarificado	Jugo Filtrado
1	649,46	557,49	532,66	566,79
2	790,03	730,18	712,80	948,33
3	828,68	856,74	809,29	1533,52
4	925,40	587,81	802,63	1765,66
5	693,15	442,96	670,27	2660,74
6	1074,00	1085,85	1025,17	2514,86
7	791,26	974,76	767,73	1219,14
8	1066,75	881,27	874,11	998,77
9	1015,75	942,60	850,65	2387,40
10	997,88	1075,03	826,61	2533,34
<i>Promedio</i>	883,24	813,47	787,19	1712,86
<i>Coefficiente de variación (%)</i>	154,00	224,21	131,17	771,46

Fuente: Elaboración propia.

Como se observa en la tabla 3.4 los valores de concentración de almidón de las corrientes, poseen un coeficiente de variación mayor que 12%, por lo que la media no es representativa de la población. Esto se debe a la variación de la cantidad de almidón que es incorporado al proceso, lo cual depende en gran medida de la variedad y el contenido de materia extraña que entra al proceso junto con la caña.

En la figura 3.5 se muestran los valores de concentración de almidón en las corrientes que se analizan en la etapa de purificación.

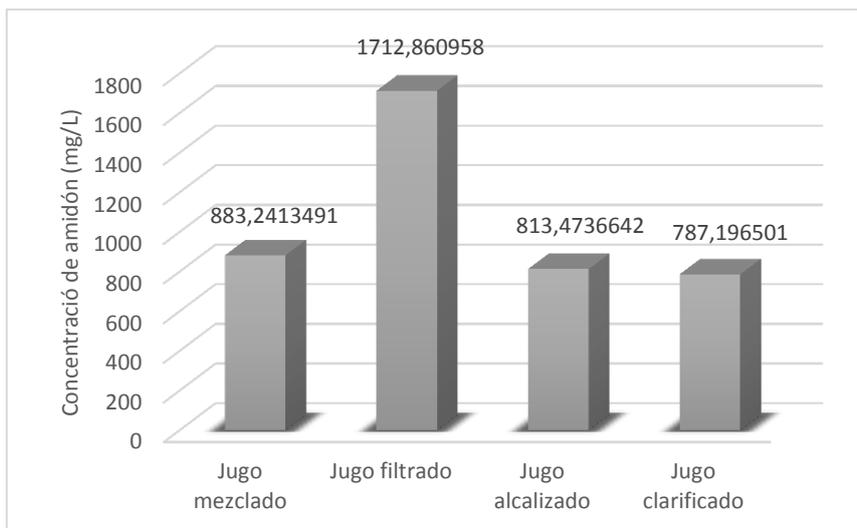


Figura 3.5. Comportamiento de almidón en la etapa de purificación.

Como se aprecia en la figura 3.7, la concentración de almidón en jugo clarificado disminuye con respecto al contenido de almidón en jugo mezclado, pero no en gran proporción. A partir de esto, se aprecia una gran discrepancia con los estudios de Alonso (2017), la cual plantea que en la etapa de clarificación se remueve gran parte del almidón que entra al proceso; estos resultados se alcanzan a razón de la presencia de dextrana. Aunque no se realiza el estudio de dextrana en el proceso, se demuestra su existencia por los datos que reportó el laboratorio de la industria en los días que se estudiaron (anexo 7), dicha impureza afecta la eficiencia del clarificador. La dextrana, tiene como característica la formación de gomas y provoca similares problemas que el almidón (Rein 2007).

Sin embargo, a pesar de la deficiencia de la clarificación con respecto al almidón, se aprecia un mayor contenido del mismo en el jugo filtrado. Castro (2015) declara que gran parte del almidón insoluble se elimina en el proceso de clarificación y filtración, pero este puede pasar al azúcar final como materia insoluble. Según Hugot (1986), esta cantidad de almidón que pasa al jugo filtrado representa un factor negativo en el proceso, pues esta corriente se recircula al tanque de alcalización con el objetivo de recuperar la sacarosa remanente que queda en el precipitado formado en la clarificación (lodos). Todo esto conlleva a que el almidón que se remueve etapa de clarificación se vuelva a incorporar al proceso.

En el jugo alcalizado también existe elevado contenido de almidón, esto puede ser producto de la alcalización en caliente debido que al trabajar a altas temperaturas (Rango de 70 a 80 °C según Ramírez 2012) trae como consecuencia la gelatinización del almidón y facilita su solubilidad en el jugo. Según Godshall *et al.*, (1990) los gránulos de almidón se dispersan rápidamente en el jugo y son luego gelatinizados por el calor y la cal durante la clarificación.

En otros estudios se demuestra que la presencia de polisacáridos contribuye a la pérdida e ineficacia de la producción de azúcar crudo; donde el almidón y la dextrana presente en los jugos de caña interfieren en el proceso de clarificación al incrementar la viscosidad de dichos jugos (Fuigueira *et al.*, 2010); sin embargo, aunque en el proceso de clarificación no se logra eliminar la mayor parte del almidón si ocurre una pequeña remoción. Según Méndez (2014) esto se debe a que en la clarificación después de obtener la coagulación de las impurezas se añade floculante, el cual aumenta el peso molecular de las partículas las cuales precipitan al fondo de los clarificadores.

3.3.2.1 Influencia de la etapa de clarificación

Para determinar el almidón que se remueve en la etapa de clarificación se aplica la metodología del subepígrafe 2.3.2.1, el análisis se realiza con valores de concentración de almidón en el jugo mezclado y clarificado que se muestran en el anexo 4, el porcentaje de remoción se presenta en la tabla 3.5.

Tabla 3.5. Porcentaje de remoción de almidón en la etapa de clarificación.

Parámetros	Días									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Remoción de almidón (%)	17,98	9,77	2,33	13,26	3,30	4,54	2,97	18,05	16,25	17,16

Fuente: Elaboración propia.

Como se aprecia en la tabla 3.5, la remoción del almidón en la etapa de clarificación varía entre un 3 y 19%, lo que indica que la remoción de almidón en la etapa de clarificación es deficiente en comparación con los resultados que alcanzan Rein (2007), Castro (2015) y Alonso (2017), cuando plantean que cerca del 80% del almidón se elimina en la clarificación. Los resultados

obtenidos se alcanzan debido a factores que afectan la etapa, como la presencia de dextrana en el proceso.

3.3.3 Comportamiento del almidón en la etapa de evaporación y cristalización

Se plantea el estudio del comportamiento del almidón en la etapa de evaporación y cristalización, para ello se tienen en cuenta la concentración de almidón presente en las corrientes de meladura, miel A, miel B y azúcar crudo; en la tabla 3.9 se muestra la caracterización estadística.

Tabla 3.6. Concentración de almidón en las corrientes de la etapa de evaporación-cristalización.

<i>Experimentos</i>	<i>Concentración de almidón (mg/L)</i>			<i>(mg/Kg)</i>
	<i>Meladura</i>	<i>Miel A</i>	<i>Miel B</i>	<i>Azúcar crudo</i>
1	651,12	366,10	558,74	375,27
2	544,56	368,08	468,14	244,85
3	650,16	358,90	564,96	269,42
4	687,92	617,43	816,28	300,61
5	653,35	616,69	788,09	311,71
6	985,98	607,18	764,31	277,22
7	646,26	596,22	551,09	321,17
8	668,25	388,27	582,86	331,80
9	538,95	364,47	515,86	337,71
10	616,35	353,83	543,55	319,98
Media	664,29	463,72	615,39	308,97
Coeficiente de variación (%)	123,47	125,80	124,74	37,67

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 3.6 se observa que los valores de concentración de almidón de las corrientes, poseen un coeficiente de variación mayor que 12%, por lo que la media no es representativa de la población. Esto se debe a la variación de la cantidad de almidón que se incorpora al proceso, lo cual depende en gran

medida de la variedad y el contenido de materia extraña que entra al proceso junto con la caña.

En la figura 3.6 se muestran los valores de concentración de almidón en las corrientes principales de la etapa de evaporación y cristalización.

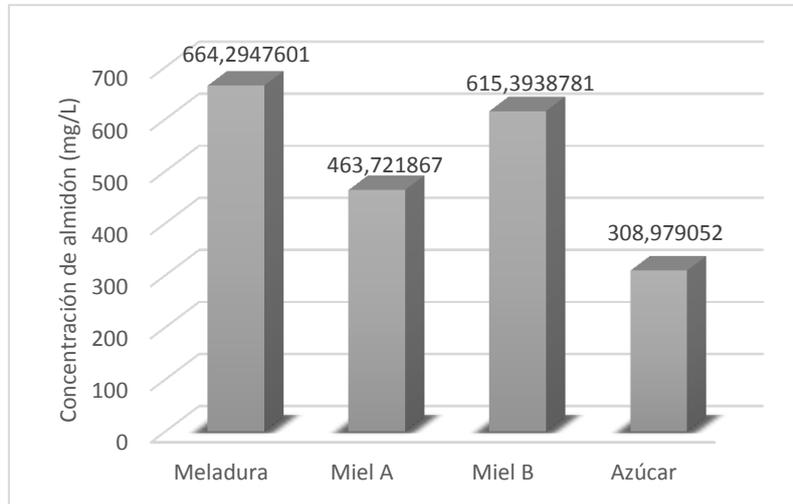


Figura 3.6. Comportamiento del almidón en las etapas de evaporación-cristalización.

Como se observa en la figura 3.6, la corriente de meladura presenta un elevado contenido de almidón en cuanto al resto de las corrientes, lo que indica que durante la cristalización gran parte permanece en las mieles, y la mayor cantidad se obtiene en la miel B, pero queda una fracción aún en el azúcar crudo.

La concentración de almidón en estas mieles indica afectaciones en la calidad del producto final, porque a partir de estas mieles se elabora el azúcar que da origen a la comercial y, como se muestra en la corriente de azúcar crudo se puede ver que el almidón se incorpora en el producto final, lo cual disminuye la pureza del mismo. En la investigación de Penados (2004), también se demuestra que el almidón tiene tendencia a ocluirse en el cristal de azúcar crudo.

3.3.3.1 Determinación del porcentaje de retención de almidón en el azúcar crudo

El almidón que se retiene en el cristal de azúcar crudo se determina a partir de los valores de concentración de almidón en el jugo mezclado y en el azúcar crudo que se encuentran en el anexo 5, el porcentaje de retención se presenta en la tabla 3.7.

Tabla 3.7. Retención de almidón en el azúcar crudo.

Parámetros	Mediciones										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Media
Retención de almidón (%)	4,7	2,5	2,4	3,1	4,6	2,4	4,5	3,2	3,5	3,1	3,3

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar en la tabla 3.7 los valores de retención de almidón varían entre 2,4 a 4,7 %, esto indica el contenido de almidón que se retiene en el cristal de azúcar crudo con respecto al contenido que entra en el proceso junto a la corriente de jugo mezclado.

Los resultados que se alcanzan están por debajo de los valores que se reportan por otros estudios similares, en comparación con la investigación de Penados (2004), el cual declara que hasta un 30 % puede quedar en el cristal de azúcar final; o por el porcentaje de retención que reporta Alonso (2017), el cual se aprecia que varía entre 6 % y 11 %.

De igual manera se demuestra que el almidón que entra junto a la caña afecta la pureza del producto final, y se remueve gran parte en las mieles.

3.4 Efecto del almidón en el consumo de vapor del proceso

El estudio del efecto del contenido de almidón en el consumo de vapor del proceso, se realiza a partir de la metodología expuesta en el epígrafe 2.4. Para ello se establecen correlaciones entre el contenido de almidón y el consumo de vapor en los calentadores, preevaporador y múltiple efecto durante 10 días de estudio, las cuales se especifican en el epígrafe 2.4, como herramienta para el análisis se utiliza el *software Statgraphics versión 5.0*.

3.4.1 Influencia del almidón en el consumo de vapor durante la etapa de purificación

El análisis se realiza mediante la correlación entre el flujo de almidón que entra a los calentadores (jugo mezclado+ jugo filtrado) con respecto al consumo de vapor total en el calentador 1, calentador 2 y calentador rectificador, los resultados para la construcción del modelo que describe la influencia (Figura 3.8) se muestran en el anexo 8. Los parámetros estadísticos de la correlación se muestran en la tabla 3.8.

Tabla 3.8. Resumen estadístico de la correlación entre el almidón que entra a los calentadores y el consumo de vapor.

Parámetros	Resultado
Coefficiente de correlación	0,8710
P-value	0,001

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 3.8 se observa que el coeficiente de correlación es cercano a 1 y el P-value es menor que 0,05, por tanto, existe una relación estadística significativa entre las variables, consumo de vapor en los calentadores y contenido de almidón de entrada los mismos.

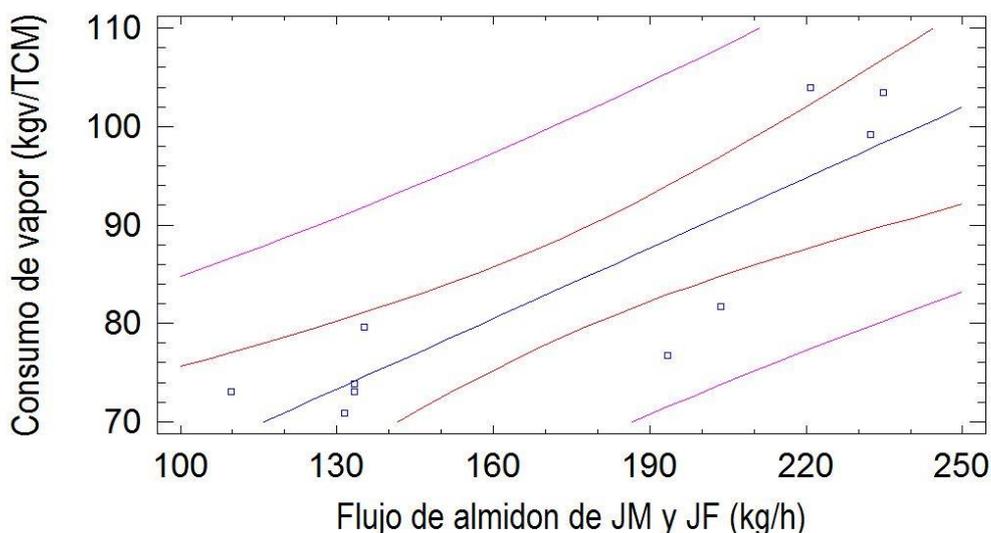


Figura 3.8. Influencia del almidón en el consumo de vapor de los calentadores.

La ecuación (3.3) describe el modelo que se ajusta a la correlación anterior

$$y = 42,3302 + 0,23849 \cdot x \quad (3.3)$$

Donde

y: Consumo de vapor en los calentadores primario, secundario y rectificador (kgv/TCM)

x: Flujo de almidón de jugo mezclado y filtrado que entra a los calentadores (kg/h)

La figura 3.8 muestra que existe correlación entre el flujo de almidón que entra a los calentadores y el consumo de vapor en estos, esto indica que el consumo de vapor aumenta con el incremento del contenido de almidón.

3.4.2 Influencia del almidón en el consumo de vapor durante la etapa de evaporación

La influencia del almidón en la etapa de evaporación se analiza mediante la correlación entre el flujo de almidón en el jugo clarificado con respecto al consumo de vapor total en el calentador de jugo clarificado, preevaporadores y múltiple efecto, los resultados para la construcción de la figura 3.9 que describe la influencia se encuentran en el anexo 9. Los parámetros estadísticos de la correlación se muestran en la tabla 3.9.

Tabla 3.9. Resumen estadístico de la correlación entre el flujo de almidón del jugo clarificado y el consumo de vapor durante la pre-evaporación.

<i>Parámetros</i>	<i>Resultados</i>
Coeficiente de correlación	0,712713
<i>P-value</i>	0,0312

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 3.9, el coeficiente de correlación se encuentra entre -1 y 1 y el *P-value* es menor que 0,05, por tanto, existe una relación estadística entre las variables, consumo de vapor en el calentador de jugo clarificado, preevaporadores y múltiple efecto y contenido de almidón en jugo clarificado.

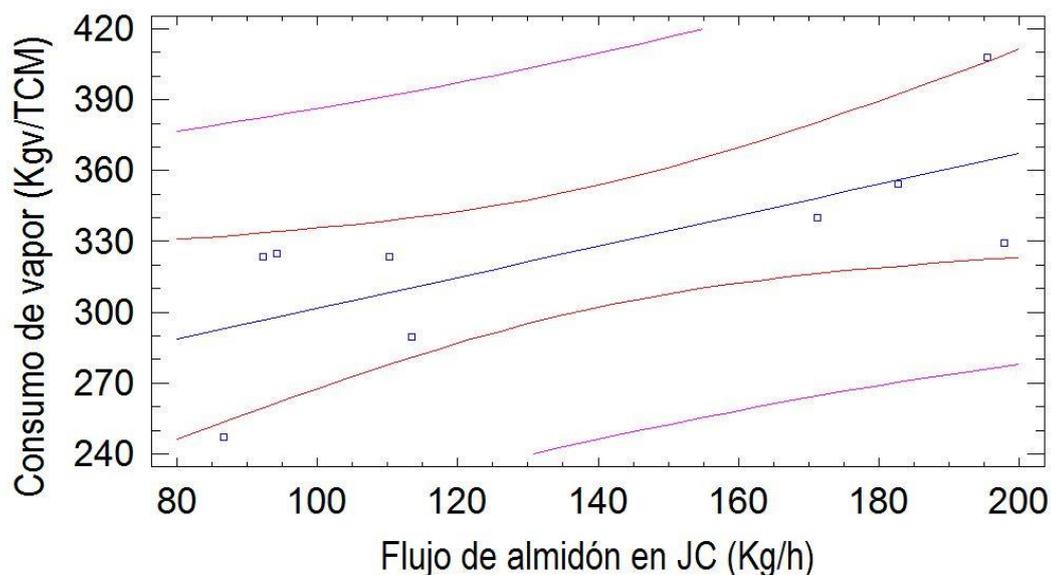


Figura 3.9. Influencia del almidón en el consumo de vapor del calentador de jugo clarificado, el preevaporadores y múltiple efecto

La siguiente ecuación (3.4) es la que describe el modelo que se ajusta a la línea de correlación entre el flujo de almidón del jugo clarificado y el calentador, preevaporadores y múltiple efecto.

$$y = 235,88 + 0,657262 \cdot x \quad (3.4)$$

Donde

y: Consumo de vapor en el calentador de jugo clarificado, preevaporador y múltiple efecto (kgv/TCM)

x: Flujo de almidón del jugo clarificado (kg/h)

En la figura 3.9 se observa que al aumentar el contenido de almidón del jugo clarificado aumenta el consumo de vapor en los equipos que intervienen en la etapa de evaporación, lo que interfiere en el funcionamiento de dichos equipos para lograr la concentración del jugo clarificado.

Para lograr concentrar este jugo y evaporar toda el agua presente es necesario consumir vapor en el primer vaso del múltiple efecto, este equipo opera mediante el principio de Rellieux según Hugot, (1987), con el aumento del almidón de la corriente a concentrar y la elevación de viscosidad producto de la gelatinización del mismo por las condiciones de trabajo, se dificulta la transferencia de calor por el efecto de baja turbulencia y la demanda de vapor aumenta.

El almidón constituye un polímero de alto peso molecular y con el efecto de la temperatura tiende a gelatinizar, esto produce un aumento de la viscosidad del medio. El aumento de la viscosidad en los jugos disminuye la turbulencia del fluido en el equipo, lo cual disminuye la transferencia de calor por convección y tiende a aumentar el consumo de vapor, de acuerdo con el criterio de Kern (1999) cuando plantea que la transferencia de calor por convección se favorece con la turbulencia. Este comportamiento se puede observar en las figuras 3.8 y 3.9. Al tener en cuenta las condiciones de operación en los calentadores, preevaporadores y múltiple efecto (Anexo 2), se llega a la conclusión de que se ofrecen las circunstancias son óptimas para que ocurra este fenómeno, debido a que el almidón comienza a gelatinizar a partir de los 80 °C.

El estudio refleja resultados en común con respecto a los que reporta Zossi *et al.* (2008), donde establecen que contenidos de almidón en jugo mayor de 250 mg/L, producen efectos negativos como el aumento de la viscosidad por efecto de la gelatinización de los gránulos de almidón y dificultan el proceso de evaporación.

3.5 Valoración económica

Se realiza la valoración económica con el objetivo de determinar el efecto económico que se genera por incumplimiento de la norma NC 85:2012, para azúcar crudo con respecto al almidón. El análisis se realiza con el contenido de almidón que se mide en el azúcar crudo durante 10 días con tres réplicas; en la tabla 3.11 se muestran los resultados que se comparan con el parámetro normado para azúcar crudo.

Tabla 3.11. Concentración de almidón en azúcar crudo.

Concentración de almidón (mg/kg)	Días										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Media
	375	244	269	300	311	277	321	331	337	319	309

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 3.11, se observa que la concentración de almidón para el primer día, incumple con la norma NC 85:2012; y en consideración al valor medio experimental, el resto de los días cumplen con el valor normado por NC

85:2012, un azúcar de calidad debe poseer un contenido de almidón por debajo de 350 mg/kg.

Sin embargo, los resultados con respecto a la Instrucción 07:2014, son significativos, porque la instrucción establece que la comercialización internacional del azúcar crudo contempla como exigencia que el contenido de polisacáridos este entre 400 y 600 mg/kg TM de azúcar crudo producido. Según el criterio que se plantea anteriormente el contenido de almidón cumple con esta norma por ser menor que el valor que se reporta, que se comprende para la comercialización a nivel internacional, pero como se registra dextrana en el proceso durante los 10 días (ver tabla 3.12), se incumple la Instrucción 07: 2014.

Tabla 3.12. Contenido de dextrana en el azúcar crudo.

Contenido de dextrana (mg/kg)	Días										Media
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
	700	710	677	671	620	673	675	672	670	221	668,9

Fuente: Reporte de hoja de laboratorio de la UEB "Mario Muñoz"

Como se observa en las tablas 3.11 y 3.12 y al analizar los parámetros de calidad para la comercialización internacional del producto, el azúcar crudo presenta un alto contenido de polisacáridos (almidón y dextrana). Como resultado de no cumplir con la Instrucción 07: 2014, se penaliza con un valor de 0,01 CUP por mg/kg TM, cuando los polisacáridos excedan los 600 mg/kg TM, lo que se reduce el precio a facturar por el azúcar crudo que se vende con destino a la exportación, a granel o en sacos.

3.6 Conclusiones parciales

1. Los modelos que describen las curvas de referencias de almidón en jugo y azúcar crudo, presentan calidad para obtener el registro del almidón en el proceso, confirman el ajuste los coeficientes de correlación cercanos a 1 y los errores relativos con valores inferiores a 10 %.
2. Mediante la evaluación del contenido de almidón, se construye el mapa de almidones y se establece el comportamiento del mismo a lo largo del proceso.

3. A partir del análisis del comportamiento del almidón en las etapas del proceso se determina que: el almidón entra al proceso junto con la caña, en la etapa de purificación la remoción varía entre un 3 y 19%, pero parte de este se incorpora en la etapa de alcalización junto con el jugo filtrado, de igual forma en la etapa de evaporación por efecto de la temperatura se produce su gelatinización completa lo cual aumenta la viscosidad de las mieles, perturba la transferencia de masa y permanece en el cristal alrededor de un 3,3% con respecto al contenido de entrada al proceso.
4. El estudio del efecto del almidón en el consumo de vapor, determina que a medida que aumenta la concentración de almidón a la entrada de los calentadores, del preevaporadores y del múltiple efecto, se dificulta la transferencia de calor y aumenta el consumo de vapor de cada equipo.
5. Las concentraciones de almidón en azúcar crudo para los 10 días de estudio en el proceso, generan pérdidas económicas por incumplimiento de los parámetros de calidad establecidas para la comercialización del azúcar crudo, en consecuencia, de la presencia de dextrana en el proceso.

Conclusiones

1. La evaluación del contenido de almidón permite obtener el comportamiento del mismo en las diferentes etapas del proceso y facilita la toma de decisiones para el control de la calidad del producto final.
2. La caracterización del proceso productivo permite establecer los 10 puntos de muestreo establecidos para conocer el comportamiento de los almidones en las etapas estudiadas.
3. A partir del análisis del comportamiento del almidón en las etapas del proceso se determina que: el almidón entra al proceso junto con la caña, en la etapa de purificación la remoción varía entre un 3 y 19%, pero parte de este se incorpora en la etapa de alcalización junto con el jugo filtrado, de igual forma en la etapa de evaporación por efecto de la temperatura se produce su gelatinización completa lo cual aumenta la viscosidad de las mieles, perturba la transferencia de masa y permanece en el cristal alrededor de un 3,3% con respecto al contenido de entrada al proceso.
4. El estudio del efecto del almidón en el consumo de vapor, determina que a medida que aumenta la concentración de almidón a la entrada de los calentadores, del pre-evaporador y del múltiple efecto, se dificulta la transferencia de calor y aumenta el consumo de vapor de cada equipo.
5. Las concentraciones de almidón en azúcar crudo para los 10 días de estudio en el proceso, generan pérdidas económicas por incumplimiento de los parámetros de calidad establecidas para la comercialización del azúcar crudo, en consecuencia, de la presencia de dextrana en el proceso.

Recomendaciones

1. Utilizar los resultados obtenidos en esta investigación para próximos estudios que tienen como base los métodos de control del almidón en el proceso de producción de azúcar.
2. Realizar una nueva investigación en el central Mario Muñoz Monroy acerca del contenido de dextrana y su influencia en el proceso.
3. En todos los centrales azucareros del país desarrollar las técnicas analíticas para determinar el contenido de almidón que entra al proceso junto con la caña y el contenido de almidón que sale en el azúcar final.

Bibliografía

1. Alexander, J. B. 1954. *Starch in Natal cane sugar*. S. Afr. Sugar J. 54 (9): 617-623.
2. Alonso, Idaimis (2017) Influencia del contenido de almidón en el proceso de producción de azúcar crudo.
3. Barros, F. S. (2012). Hidrólisis enzimática del almidón residual en extractos líquidos de camote, para elaboración de miel y estudio de sus propiedades funcionales. Proyecto previo a la obtención del título de Ingeniero Agroindustrial. Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador
4. Bartens A. (1995). *Energy Manual for sugar factories*. 2^{da} Edición. Berlín
5. Biliaderis, C. G. *Structures and paste transitions of starch in food systems*. *Food Technology*, v. 46, n. 6, p. 98-109, 1992
6. Bolaños, F. (2012). Medición de Almidón en el azúcar de Costa Rica. Costa Rica.
7. Boyes B. (1960). *Starch in the manufacture of raw sugar*.
8. Brumovsky, L. A. (2014). Química del almidón. Universidad Nacional de Misiones. Argentina.
9. Cardona M. (2009). Seguimiento de las variables fisicoquímicas del clarificador y verificación de la eficiencia del tacho continuo fletcher smith para la optimización de la elaboración de azúcar en el ingenio Risaralda. Universidad tecnológica de Pereira. Escuela de tecnología química. Pereira.
10. Carrazana Luis, L. (1975). El proceso de purificación de los jugos en la industria azucarera. Conferencia ATAC.
11. Carrazana, L. (1987). Análisis Agro Industrial Azucarero Teoría y práctica, Editorial Pueblo y Educación.
12. Castro N. (2015). Determinación de la concentración de almidón por caracterización espectrofotométrica en el jugo de caña de azúcar de las variedades: cp72-2086, cp88-1165 y cp73-1547 utilizadas en el ingenio Trinidad Guatemala. *Published Online September 2014 in Sci Res*. <http://www.scirp.org/journal/jsbs>
13. Chen, G., Zhou, J., Liu, Y., Lu, X., Han, C., Zhang, W., Xu, Y. y Yan, Y. (2016). *Biosynthesis and Regulation of Wheat Amylose and Amylopectin from Proteomic and Phosphoproteomic Characterization of Granulebinding Proteins*. *Scientific Reports*, 6:33111, DOI: 10.1038/srep33111

14. Chiu, C. y Solarek, D. (2009). *Modification of Starches*. Akzo Nobel Surface Chemistry LLC *Starch: Chemistry and Technology*, Third Edition. National Starch and Chemical Co., Bridgewater, New Jersey. ISBN: 978-0-12-746275-2.
15. Clark, J. A. 1975. *Tecnología General de la Producción de Azúcar Crudo*. Dpto de Capacitación del MINAZ.
16. Cole, M.R., Eggleston, G., Gilbert, A. and Chung, Y.J. (2014) *Development of an Analytical Method to Measure Insoluble and Soluble Starch in Sugarcane and Sweet Sorghum Products*. *Food Chemistry* (in Review).
17. COPERSUCAR. 2004. *Métodos de análisis emacucar, alcool e procesos*. Versao 03. [CD ROM]. Centro de Tecnología Copersucar, Estado de Sao Paulo, Brasil.
18. Cuddihy, J. A., Porro, M. E., and Rauh, J. S. (2001). *The presence of total polysaccharides in sugar production and methods for reducing their negative effects*. *J.Amer. Soc. of Sugar Cane Technol*, 21: 73-91
19. Doherty, W; Rackemann, D. (2009). *Some aspects of calcium phosphate chemistry in sugar cane clarification*. *International Sugar Journal*. Disponible en <http://eprints.qut.edu.au/34335/1/c34335.pdf>. p 448-455.
20. Eggleston G., Wartelle, L., Triplett, A., Montes, B., Pontif, K., Cole M. and Cyr, E. St. (2015). *Insoluble and Soluble Starch: Changes Across Sugarcane Factories and How They Are Controlled by Amylase Applications*. Southern Regional Research Center, New Orleans, LA.
21. Eggleston, G., Antoine, A., Montes, B., Stewart, D., Kimbeng, C. y Zhou, M. (2008b). *Further optimization of α -amylase application in Louisiana factories*. ASSCT Louisiana Division meeting, Baton Rouge
22. Eggleston, G., Cole, M. and Andrzejewski, B. (2013). *New Commercially Viable Processing Technologies for the Production of Sugar Feedstocks from Sweet Sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) for Manufacture of Biofuel and Bioproducts*. *Sugar Technology*, 15, 232-249. <http://dx.doi.org/10.1007/s12355-013-0229-6>
23. Eggleston, G., Grisham, M., Tew, T., Triche, R. y Antoine, A. (2008). *Delivery and processing quality of trash tissues by different sugarcane varieties*. *International Sugar Journal*
24. Eggleston, G., Monge, A. y Ogier, B. (2003). *Sugarcane factory performance of cold, intermediate, and hot lime clarification systems*. *Journal Food Process and Preservation*, 26(6), p. 433-454

25. Eggleston, G., Montes, B., Monge, A. y Guidry, D. (2006). *Optimization of α -amylase application in raw sugar manufacture*. Proc. Sug. Process. Res. Conf., Brazil, p. 319-340.
26. Eggleston, G., Viator, R. and Grisham, M. (2007). *Glyphosphateripener effects on the processing quality of different sugarcane tissues*. Proc. ISSCT Congress, South Africa, 26, p. 1460-1467
27. Godshall, M. A. (2004). *Collaborative study on starch in raw sugar using the SPRI rapid starch method*. Proc. SPRI Conference, Atlanta, Georgia, USA, p. 442-448
28. Godshall, M. A., Triche, R. and Moore, S. J. (2004). *A rapid starch test for use in cane mills*. En: Proc. SPRI Conference on Sugar Processing Research, Atlanta, Georgia, USA, pp. 428-440
29. Godshall, M. A.; M. A. Clarke and C. D. Dooley. (1990). *Starch: process problems and analytical developments*. En: Proc. SPRI Conference, San Francisco, A, USA, pp. 244-264
30. Godshall, M.A., Clarke, M.A. and Dooley, C.D. (1991). *Starch: process problems and analytical developments. Proceedings of the Sugar Processing Research Conference: 244 – 264*
31. Greenwood, J; Rainey, T; Doherty, W. 2011. *Light scattering study on the size and structure of calcium phosphate/hydroxyapatite flocs formed in sugar solutions*. *Revista Colloid and Interface Science*. Disponible en <http://eprints.qut.edu.au/14792/1/14792.pdf>. Consultado 23/4/2014. p66-71.
32. Hernández M., Torruco J., Chel L., Betancurt D. (2008). *Caracterización fisicoquímica de almidones de tubérculos cultivados en Yucatán, México*. Ciênc. Tecnol. Aliment., Campinas, 28(3): 718-726.
33. Herrera, Ana C. (2011). *Estudio comparativo de métodos para la determinación de sacarosa y azúcares reductores en miel virgen de caña utilizados en el ingenio Pichichí S.A. Colombia*. Universidad Tecnológica de Pereira, Facultad de Tecnologías.
34. Honing, Peter. (1987). *Principios de la Tecnología Azucarera*. Editorial Pueblo y Educación, La Habana
35. Hugot, E. (1986). *Handbook of cane sugar engineering*. Elsevier Science Publishers: New York.
36. Hugot, E. (1987). *Manual para Ingenieros Azucareros*. Tercera reimpresión. Editorial Edición Revolucionaria.
37. ICUMSA (2005). *International Commission for Uniform Methods of Sugar Analysis (ICUMSA). Method book*. Bartens, Berlín, Germany.

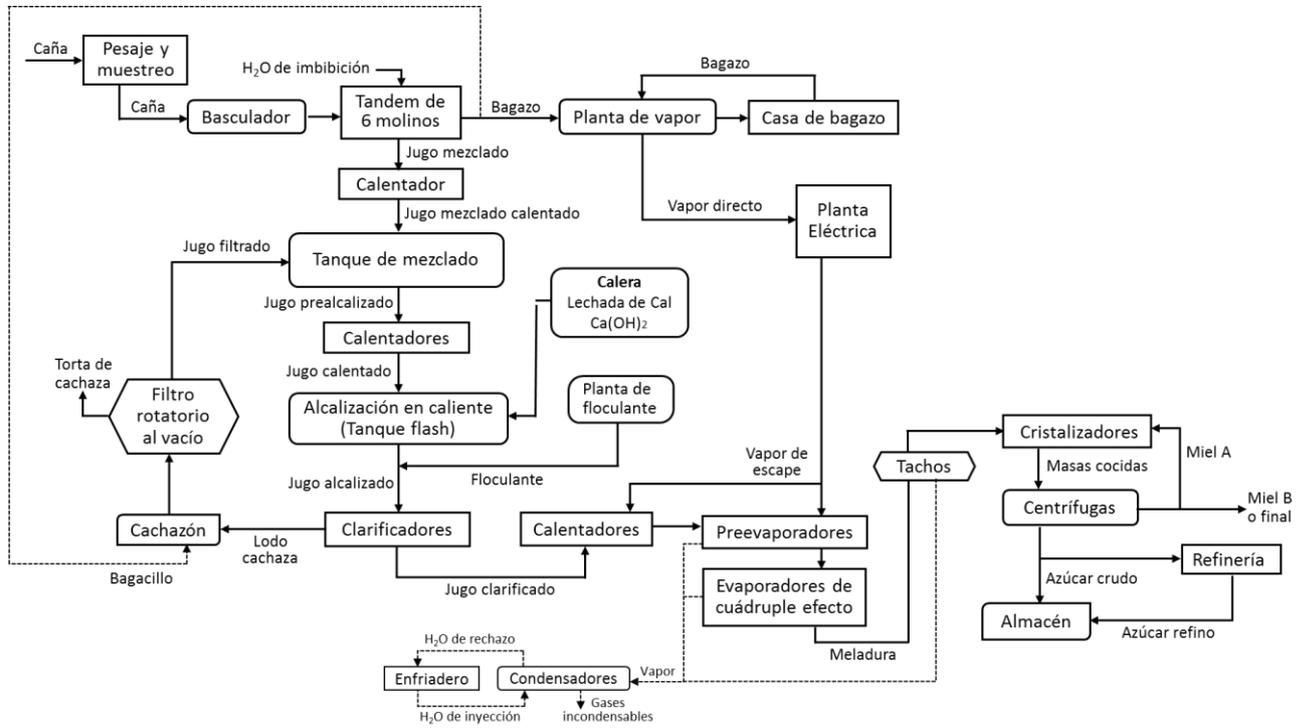
38. ICUMSA. (2007). *International Commission for Uniform Methods of Sugar Analysis. Method book*. Ed. Bartens, Berlin, Germany
39. Instrucción no. 07/2014. Penalización y bonificación por los polisacáridos en azúcar crudo. AZCUBA.
40. Jenkins, G. 1971. *Introducción a la Tecnología del Azúcar de Caña*. Ediciones de Ciencia y Técnica. La Habana.
41. Jimenez, A. (2014). *Desarrollo de un modelo matemático para el pronóstico del funcionamiento de un generador de vapor de un solo paso*. Trabajo de diploma en opción del título: Ingeniero Químico. Cuba.
42. Jimenez, A., Luis., Lugo, R., Ramírez., Gómez. (2016). *Influencia del almidón y tecnologías de control en el proceso de producción de azúcar crudo y refino*. Universidad de Matanzas "Camilo Cienfuegos". Matanzas.
43. Kampen, W.H., Tan, Q. and Cuddihy, J.A. Jr (1998). *The action of alpha amylase on sugar cane starch*. American Society of Sugar Cane Technologists. June 17 to 19, St. Petersburg, Florida.
44. Keenan Joseph H .1988. *Steam Tables*. Edición Revolucionaria. La Habana.
45. Kern, DQ. (1991). "Procesos de Transferencia de Calor". Continental S.A.
46. Knutzon and Grove M., (1994). *Rapid method for estimation of amylose in maize starches*. *Cereal Chemistry*, 71(5), p.469.
47. Larrahondo, J. E. (1995). *Calidad de la caña de azúcar*. En CENICAÑA: El cultivo de la caña en la zona azucarera de Colombia, Cali. p. 337-354.
48. Larrahondo, J. E. (2013). *Definición y alcances de la alcoquímica: la calidad de las materias primas y su impacto en el proceso alcoquímico*. III Congreso AETA, Sep.18-20 del 2013. Guayaquil-Ecuador.
49. Li M., Cole M., Tonnis B., Pinnow D., Xin Z., Davis J., Hung Y., Yu J., Pederson G., Eggleston G. (2014). *Comparison of Stem Damage and Carbohydrate Composition in the Stem Juice between Sugarcane and Sweet Sorghum*. <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>
50. MACU (Manual de métodos analíticos para azúcar crudo). (2004). Instituto Cubano de Investigaciones Azucareras. División de Aseguramiento de la Calidad.
51. Manual de Operaciones. (2013). Grupo Azucarero AZCUBA.
52. Matic, M. (1971). *Starch determination in raw sugar by colorimetric methods*. En: Proc. ISSCT Congress, 14, New Orleans, Louisiana, USA: p 1434-1443.
53. Melian D. (2010) *Ensayo comparativo de dos metodologías de extracción de almidón de papa usando muestra de diez variedades nativas de Chiloe y dos*

- variedades comerciales. Universidad Austral de Chile. Escuelas Ingeniería de Alimentos. Chile.
54. Mendez S. (2014). Evaluación de floculantes en la clarificación de jugos de caña de la Unidad Empresarial de Base Jesús Rabí. Universidad de Matanzas “Camilo Cienfuegos”.Facultad de Ingenierías. Cuba
 55. Monteiro, P. y Oliveira, P. (2010). *Application of microbial alfa-amylase in industry- A review .Brazilian Journal of Microbiology*, 41: p. 850-861. ISSN 1517-8382
 56. Morales, Y. L; Kafarov, V; Ruiz, F; Castillo, E. F. (2010). Modelamiento de los procesos de producción de bioetanol de primera y segunda generación a partir de caña de azúcar. Etapas; preparación, molienda y clarificación. Umbral Científico, núm. 16, junio, 2010, pp. 47-59. Universidad Manuela Beltrán, Bogotá, Colombia.
 57. NC 85: 2011.Norma Cubana. Azúcar crudo –especificaciones. Oficina nacional de normalización.
 58. Pavlov, K.(1981). Problemas y ejemplos para el curso de operaciones básicas y aparatos en Tecnología Química .Moscú: Editorial MIR.
 59. Pedrosa Puertas, R.1983. Fabricación de Azúcar Crudo.
 60. Peña, A. A. (2009). Hidrólisis del almidón de yuca mediante la utilización de preparaciones solubles e insolubilizadas de alfa-amilasa. Universidad industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.
 61. Penados, M. F. (2004). Evaluación del impacto de adicionar la enzima alfa amilasa durante el proceso de evaporación en los niveles de almidón de azúcar crudo producido en un ingenio azucarero. Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala.
 62. Pérez, Héctor. (2009).El análisis de procesos y el empleo adecuado de la energía en la producción de azúcar crudo y electricidad en ingenios cubanos. Editorial Universitaria, Ciudad de La Habana, Cuba
 63. Posada, E. D. (1987). Tecnología de la Producción Azucarera. ISPJAE. La Habana, Cuba.
 64. Ramírez, R. (2012).Universidad nacional abierta y a distancia (UNAD). Escuela de ciencias básicas tecnología e ingeniería. Programa de ingeniería de alimentos. Duitama.
 65. Rein, P. (2007). *Cane Sugar Engineering*.Ed. Bartens, Berlin, Germany.
 66. Rodríguez R., Rodríguez J., Mesas J., Sánchez A., Gay M. (2014). Comportamiento de algunos parámetros de los azúcares crudos analizados

- durante el quinquenio 2006-2010. Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar (ICIDCA). Vol.48, No.3, pp 11-15
67. Rohde, A. (2006). *Sugazym dextranasa y amylasa en la industria azucarera. Published by agrimedia Gmb.*
68. Rosero, E. y Ramírez, J. (2009). Modelado y Control de Molinos de Caña de Azúcar usando Accionamientos Eléctricos. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*. [on line]. Vol. 6, Núm. 3, Julio 2009, pp. 44-53. Disponible en: <http://www.elsevier.es>
69. Sargent, R. G. (2009). *Verification and validation of simulation models*. En: *Proceedings of the 2009 Winter Simulation Conference*. Syracuse, Estados Unidos.
70. Schlesinger, S. (1979). *Terminology for model credibility*. *Simulation*, 32: 103-104
71. Svarovsky, L. 2011. *Solid-Liquid Separation*. Cuarta Edición. Londres: Editorial Elsevier.
72. Tester, R.F., Karkalas, Qi, X. (2004). *Starch structure and digestibility. Enzyme-substrate relationship*. *World's Poultry Science Journal* 60: 186-195.
73. 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*
74. Wang, I. Z.; White, p. J. *Structure and properties of amylose, amylopectin and Intermediate materials of oat starches*. *Cereal Chemistry*, v. 71, n. 5, p. 263-268, 1994b.
75. Zhou, M., Kimbeng, C. A., Eggleston, Viator, R.P., Hale, R.P., and Gravois K.A. (2008). *Issues of starch in sugarcane processing and prospects of breeding for low starch content in sugarcane*. *Sugar Cane International*, vol. 26, No.3.
76. Zossi, B. S., Cárdenas J. G., Sorol, N. y Sastre, M. (2010). Influencia de compuestos azúcares y no azúcares en la calidad industrial de caña de azúcar en Tucumán (R. Argentina) Parte 1: caña limpia y despuntada. *Revista Industrial y Agrícola de Tucumán*, 87 (1): p.15-27. ISSN 0370-5404.
77. Zossi, B. S., Cárdenas, G., Sorol Natalia y Sastre, M. (2011). Influencia de compuestos azúcares y no azúcares en la calidad industrial de caña de azúcar en Tucumán. R. Argentina: caña verde y quemada. *Revista Industrial y Agrícola de Tucumán*, Tomo 88 (1):13-21
78. 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

1. Diagrama general del proceso de producción de azúcar crudo en el central Mario Muñoz Monroy.



2. Datos necesarios para el desarrollo de los balances de masa y energía. Resultados.

Variables	Día 1	Día 2	Día 3	Día 4	Día 5	Día 6	Día 7	Día 8	Día 9	Día 10
Caña molida(t/h)	167,917	196,615	136,956	255,223	182,592	187,565	183,105	256,246	206,008	255,223
Fibra en caña(%)	15,200	15,800	15,200	15,400	15,500	15,800	15,600	16,100	15,900	15,700
Pol en caña (%)	10,070	9,280	9,240	9,430	9,740	9,810	9,740	9,600	9,530	9,250
Fibra en bagazo (%)	45,167	44,850	44,486	44,200	45,367	44,769	44,530	45,500	44,830	45,100
Humedad del bagazo (%)	51,050	50,570	50,470	50,180	51,800	50,310	50,400	51,400	50,480	50,400
Pol en bagazo (%)	2,330	2,570	2,380	2,340	2,330	2,510	2,610	2,390	2,640	2,670
Brix del bagazo (°Bx)	5,550	6,600	6,070	5,930	5,720	6,180	6,470	6,000	6,550	6,720
Agua de imbibición(t/h)	54,000	42,570	42,070	51,530	51,290	49,450	39,910	59,880	47,900	43,910
T agua imbibición (°C)	69,500	59,560	67,000	71,000	71,200	65,720	68,000	69,360	70,000	67,200
Brix Jugo mezclado(°Bx)	14,800	14,500	14,380	14,670	14,000	14,700	15,060	14,800	15,180	14,990
pH Jugo mezclado	5,200	5,100	5,100	5,200	5,200	5,200	5,100	5,200	5,200	5,100
Pol Jugo mezclado (%)	11,170	11,710	11,760	12,050	12,050	12,090	12,460	12,210	12,540	12,420
Brix del Jugo Alcalizado(°Bx)	14,100	14,300	15,200	14,000	14,000	14,200	14,400	15,300	14,500	14,000
pH del Jugo Alcalizado	7,300	7,500	7,200	7,400	6,900	7,000	7,100	7,000	7,400	7,300
Brix del Jugo Filtrado(°Bx)	12,600	12,760	14,070	13,400	12,800	13,000	12,950	13,500	13,640	13,400
Brix del Jugo Clarificado(°Bx)	14,800	15,400	14,400	14,640	15,800	15,800	14,550	14,770	15,200	14,800
pH del Jugo Clarificado	6,900	6,870	6,800	7,000	7,000	7,100	7,000	6,900	6,900	7,000
Humedad de la cachaza(%)	74,400	75,400	76,280	74,200	76,700	75,400	75,200	76,500	75,400	75,400
Brix del jugo extraído a la cachaza(°Bx)	7,953	8,225	8,333	7,900	8,700	8,240	8,230	8,750	8,450	8,260
Concentración Lechada de cal(°Be)	4,000	6,000	4,000	6,000	8,000	4,200	4,000	4,000	6,500	4,000
Insolubles en lodos(%)	12,160	7,802	16,801	11,207	6,030	11,074	8,508	12,606	7,537	11,160
Insolubles en Jugo Filtrado(%)	4,63	5,46	5,57	4,64	5,721	6,375	4,565	7,850	4,758	7,850
Insolubles en Jugo Clarificado(%)	0,290	1,639	0,18	0,311	0,651	0,160	1,290	0,290	0,270	0,290
Insolubles en Jugo Mezclado(%)	2,8	2,67	1,54	2,732	2,770	2,770	2,750	1,160	2,210	2,916
Insolubles en Jugo Alcalizado(%)	2,752	2,731	2,3	2,443	2,554	2,766	2,698	1,500	1,982	2,856
Pol en cachaza(%)	3,960	2,740	3,630	2,620	2,560	2,500	2,500	2,460	2,410	2,390
Brix de la meladura(°Bx)	67,000	66,400	68,800	66,900	60,000	65,000	60,800	62,800	65,210	64,200
Pol de la meladura(%)	53,710	52,900	54,070	54,930	54,630	54,820	54,580	55,250	55,070	54,840
Pureza de la meladura(%)	81,490	82,600	82,680	83,030	81,100	83,250	83,580	83,050	83,030	83,340
Pureza de la miel final(%)	55,600	55,000	55,080	55,400	56,110	55,180	54,980	55,050	55,080	55,070
Brix de la miel final(°Bx)	89,110	86,430	87,150	86,020	89,190	86,900	86,400	87,700	86,940	87,260
Pol de azúcar(%)	99,500	99,280	99,170	99,300	99,500	99,310	99,310	99,290	99,580	99,678
Humedad del azúcar(%)	0,190	0,170	0,160	0,160	0,150	0,150	0,160	0,150	0,150	0,140
Insolubles en azúcar(%)	0,030	0,020	0,020	0,020	0,020	0,030	0,020	0,030	0,020	0,020
Pol de la miel final(%)	49,550	47,810	48,000	47,650	50,040	47,950	47,500	48,280	47,880	48,050

Balances de masa en la etapa de MOLIENDA										
Resultados	Día 1	Día 2	Día 3	Día 4	Día 5	Día 6	Día 7	Día 8	Día 9	Día 10
Residuo Leñoso(t/h)	56,509	69,265	46,796	88,924	62,384	66,196	64,146	90,672	73,065	88,847
Jugo Mezclado(t/h)	165,407	169,921	132,231	217,829	171,497	170,819	158,868	225,454	180,842	210,286
Pol Jugo mezclado(%) (calculado)	9,427	9,690	8,728	10,094	9,523	9,799	10,172	9,950	9,790	10,099

Balances de masa en la etapa de PURIFICACIÓN										
--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

Balances de masa en alcalización										
Resultados	Día 1	Día 2	Día 3	Día 4	Día 5	Día 6	Día 7	Día 8	Día 9	Día 10
Brix lechada de cal(°Bx)	7,200	10,800	7,200	10,800	14,400	7,560	7,200	7,200	11,700	7,200
Jugo filtrado(t/h)	15,443	9,383	19,284	18,255	8,241	8,489	12,874	8,346	13,536	14,275
Jugo alcalizado(t/h)	194,274	184,885	135,237	278,269	204,463	190,637	183,712	218,029	234,139	253,917
Lechada de cal(t/h)	13,423	14,356	12,560	31,340	12,456	11,329	11,970	11,476	20,500	11,000

Balances de masa en el Clarificador										
Resultados	Día 1	Día 2	Día 3	Día 4	Día 5	Día 6	Día 7	Día 8	Día 9	Día 10
Lodo(t/h)	40,295	32,759	17,249	54,447	72,347	45,520	35,835	21,421	55,163	59,947
Jugo clarificado(t/h)	153,979	152,127	117,988	223,822	132,115	145,117	147,877	196,607	178,976	193,970

Balances de masa en la etapa general de Purificación										
Resultados	Día 1	Día 2	Día 3	Día 4	Día 5	Día 6	Día 7	Día 8	Día 9	Día 10
Insolubles en el bagacillo(%)	45,167	44,850	44,486	44,200	45,367	44,769	44,530	45,500	44,830	45,100
Brix del bagacillo(°Bx)	3,783	4,580	5,044	5,620	2,833	4,921	5,070	3,100	4,690	4,500
Brix de la cachaza(°Bx)	6,428	6,757	6,935	6,365	7,309	6,771	6,744	7,336	6,959	6,789
Insolubles en cachaza(%)	19,172	17,843	16,785	19,435	15,991	17,829	18,056	16,164	17,641	17,811
Cachaza(t/h)	47,852	51,724	54,103	48,917	74,263	52,873	63,800	80,446	44,553	60,870
Bagacillo(t/h)	11,047	16,021	16,314	9,621	17,600	11,006	20,342	24,085	9,695	11,690
Agua de lavado(ton/h)	11,954	3,553	10,986	13,950	7,500	7,480	7,480	7,405	12,493	21,864

Balances de masa en la etapa de CRISTALIZACIÓN										
--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

Resultados	Día 1	Día 2	Día 3	Día 4	Día 5	Día 6	Día 7	Día 8	Día 9	Día 10
Brix del azúcar crudo(%)	99,810	99,830	99,840	99,840	99,850	99,850	99,840	99,850	99,850	99,860
Pureza del azúcar crudo(%)	99,689	99,449	99,329	99,459	99,649	99,459	99,469	99,439	99,730	99,818
Brix de la miel final(%)	89,110	86,430	87,150	86,020	89,190	86,900	86,400	87,700	86,940	87,260
Pureza de la meladura(%)	80,164	79,669	78,590	82,108	91,050	84,338	89,770	87,978	84,450	85,421
Meladura(t/h)	34,013	35,282	24,695	48,980	34,790	35,275	35,388	46,240	41,718	44,716
Fración Sólidos de M que van al AC	0,557	0,555	0,531	0,606	0,802	0,659	0,782	0,742	0,658	0,678
Fración Sólidos de M que van al MF	0,443	0,445	0,469	0,394	0,198	0,341	0,218	0,258	0,342	0,322
Masa de sólidos en meladura(t/h)	22,789	23,427	16,990	32,768	20,874	22,928	21,516	29,039	27,204	28,708
Masa de sólidos en Miel Final(t/h)	10,092	10,426	7,963	12,905	4,123	7,830	4,691	7,498	9,310	9,236
Masa de sólidos en Azúcar C(t/h)	12,697	13,002	9,027	19,863	16,751	15,099	16,825	21,541	17,895	19,471
Miel Final(ton/h)	11,326	12,062	9,137	15,002	4,623	9,010	5,429	8,550	10,708	10,585
Azúcar Comercial(ton/h)	12,721	13,024	9,042	19,895	16,777	15,121	16,852	21,573	17,922	19,498

BALANCE AUXILIAR										
------------------	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

Resultados	Día 1	Día 2	Día 3	Día 4	Día 5	Día 6	Día 7	Día 8	Día 9	Día 10
Jugo mezclado	165,407	169,921	132,231	217,829	171,497	170,819	158,868	225,454	180,842	210,286
Jugo filtrado	15,443	9,383	19,284	18,255	8,241	8,489	12,874	8,346	13,536	14,275
Flujo (JM+JF)	180,850	179,304	151,514	236,084	179,739	179,308	171,742	233,800	194,378	224,561
Brix jugo mezclado (°Bx)	14,800	14,500	14,380	14,670	14,000	14,700	15,060	14,800	15,180	14,990
Brix jugo filtrado (°Bx)	12,600	12,760	14,070	13,400	12,800	13,000	12,950	13,500	13,640	13,400
Brix (JM+JF)	14,612	14,409	14,341	14,572	13,945	14,620	14,902	14,754	15,073	14,889
Brix jugo clarificado	14,800	15,400	14,400	14,640	15,800	15,800	14,550	14,770	15,200	14,800

CALENTADOR PRIMARIO										
---------------------	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

Resultados	Día 1	Día 2	Día 3	Día 4	Día 5	Día 6	Día 7	Día 8	Día 9	Día 10
Cp JM+JF (kcal/kg °C)	0,918	0,919	0,920	0,918	0,922	0,918	0,917	0,917	0,916	0,917
Temperatura de entrada (°C)	48,300	47,000	46,000	47,500	48,000	47,400	48,500	48,000	46,500	47,000
Temperatura de salida (°C)	66,800	67,000	65,000	67,500	66,400	67,000	66,500	67,000	65,000	64,000
Pv cuerpo del 2do vaso	0,240	0,200	0,150	0,300	0,250	0,300	0,200	0,150	0,300	0,150
λ (kcal/kg)	522,823	526,770	532,656	517,656	521,890	517,656	526,770	532,656	517,656	532,656
Demanda vapor (kg/h)	6110,735	6508,696	5169,360	8712,038	6075,772	6482,666	5593,926	7956,731	6614,748	6832,210
D (kg vapor/t CM)	30,888	32,899	26,129	44,036	30,711	32,768	28,275	40,219	33,435	34,535

CALENTADOR SECUNDARIO										
Resultados	Día 1	Día 2	Día 3	Día 4	Día 5	Día 6	Día 7	Día 8	Día 9	Día 10
Cp JM+JF (kcal/kg °C)	0,918	0,919	0,920	0,918	0,922	0,918	0,917	0,917	0,916	0,917
Temperatura de entrada (°C)	68,000	67,000	65,500	64,000	67,000	68,000	69,000	66,000	65,000	64,000
Temperatura de salida (°C)	84,000	85,000	83,200	80,500	86,000	85,000	84,500	85,000	80,000	86,000
Pv cuerpo del pre	0,300	0,400	0,600	0,500	0,500	0,550	0,600	0,600	0,500	0,400
λ (kcal/kg)	517,656	510,478	499,115	504,426	504,426	501,675	499,115	499,115	504,426	510,478
Demanda vapor (kg/h)	5337,717	6044,778	5139,281	7375,938	6491,108	5801,833	5083,897	8491,425	5503,973	9225,798
D (kg vapor/t CM)	26,980	30,554	25,977	37,283	32,810	29,326	25,697	42,921	27,821	46,633

CALENTADOR RECTIFICADOR										
Resultados	Día 1	Día 2	Día 3	Día 4	Día 5	Día 6	Día 7	Día 8	Día 9	Día 10
Cp JM+JF(kcal/kg °C)	0,918	0,919	0,920	0,918	0,922	0,918	0,917	0,917	0,916	0,917
Temperatura de entrada (°C)	86,000	84,000	83,200	80,000	86,000	85,500	84,000	83,000	81,000	86,500
Temperatura de salida (°C)	95,000	93,500	96,000	90,000	92,000	94,000	95,500	92,000	92,000	95,000
Pv cuerpo del pre	0,300	0,400	0,600	0,500	0,500	0,550	0,600	0,600	0,500	0,400
λ (kcal/kg)	517,656	510,478	499,115	504,426	504,426	501,675	499,115	499,115	504,426	510,478
Demanda vapor (kg/h)	3002,466	3190,300	3716,542	4470,265	2049,824	2900,916	3771,924	4022,254	4036,247	3564,513
D (kg vapor/t CM)	15,176	16,126	18,786	22,596	10,361	14,663	19,066	20,331	20,402	18,017

CALENTADOR DE J CLARIFICADO										
Resultados	Día 1	Día 2	Día 3	Día 4	Día 5	Día 6	Día 7	Día 8	Día 9	Día 10
Cp JC (kcal/kg °C)	0,917	0,914	0,919	0,918	0,912	0,912	0,919	0,917	0,915	0,917
Temperatura de entrada (°C)	91,000	93,200	93,000	89,600	91,000	90,500	92,000	90,600	91,500	90,500
Temperatura de salida (°C)	95,000	96,000	96,000	93,500	95,000	94,000	95,500	93,000	94,000	93,500
Pv del cuerpo	1,800	1,300	1,200	1,600	1,700	1,600	1,200	1,400	1,800	2,000
λ (kcal/kg)	457,512	471,938	475,167	462,967	460,191	462,967	475,167	468,828	457,512	452,321
Demanda vapor (kg/h)	1671,181	1129,913	1209,762	1611,777	1651,306	1436,231	1410,099	978,686	1041,937	1267,771
D (kg vapor/t CM)	8,447	5,711	6,115	8,147	8,347	7,260	7,128	4,947	5,267	6,408

Balance auxiliar para preevaporadores										
Resultados	Día 1	Día 2	Día 3	Día 4	Día 5	Día 6	Día 7	Día 8	Día 9	Día 10
Caña molida(t/h)	167,917	196,615	136,956	255,223	182,592	187,565	183,105	256,246	206,008	255,223
Jugo clarificado(kg/h)	153978,555	152126,584	117987,515	223821,896	132115,448	145116,953	147877,346	196607,302	178976,306	193970,271
Brix del Jugo clarificado(*Bx)	14,800	15,400	14,400	14,640	15,800	15,800	14,550	14,770	15,200	14,800
Brix del Jugo clarificado concentrado(*Bx)	17,109	17,880	18,000	18,200	17,900	17,600	18,050	17,300	18,000	18,500
Temperatura de entrada del jugo clarificado(°C)	94,500	95,600	92,000	93,500	94,000	95,000	94,000	92,000	93,000	92,500
Temperatura de vapor en la calandria(°C)	122,300	124,300	123,500	123,500	128,320	126,370	131,930	131,170	128,320	123,500
Temperatura del condensado (°C)	94,910	95,000	95,100	94,900	95,000	95,000	94,050	94,800	95,000	95,000
Presión de vapor en la calandria(kgf/cm ²)	1,200	1,400	1,500	1,300	1,300	1,700	1,500	1,500	1,400	1,300
Presión de vapor en el cuerpo(kgf/cm ²)	1,600	1,360	1,100	1,000	1,120	1,600	1,200	1,100	1,200	1,180
Presión de vapor en la calandria(MPa)(absoluta)	0,220	0,240	0,250	0,230	0,230	0,270	0,250	0,250	0,240	0,230
Presión de vapor en el cuerpo(MPa)(absoluta)	0,260	0,236	0,210	0,200	0,212	0,260	0,220	0,210	0,220	0,218
Temperatura de saturación del jugo clarificado(°C)	128,730	125,500	121,780	120,230	122,076	128,730	123,270	121,780	123,270	122,970
Calor de vaporización λvcu (kcal/kg)	520,507	522,682	525,239	526,267	525,048	520,507	524,235	525,239	524,235	524,426
Densidad de la solución (kg/m ³)	1010,000	1012,000	1013,000	1014,000	1012,000	1005,000	1010,000	1010,000	1009,000	1011,000
Caída de presión hidrostática(MPa)	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006
Presión de la capa media del líquido(bars)	0,266	0,242	0,216	0,206	0,218	0,266	0,226	0,216	0,226	0,224
Temperatura de la capa media del líquido(°C)	129,496	126,386	122,680	121,170	122,970	129,496	124,140	122,680	124,140	123,854
Entalpia del vapor de escape (v.sobrec) (kcal/kg)	650,428	649,206	647,799	647,490	648,431	650,428	648,612	651,873	648,612	648,407
Entalpia del condensado de salida del preevaporador (kcal/kg)	95,120	95,206	95,311	95,110	95,206	95,206	94,969	95,294	95,206	95,206

PREEVAPORADORES										
Resultados	Día 1	Día 2	Día 3	Día 4	Día 5	Día 6	Día 7	Día 8	Día 9	Día 10
Capacidad calorífica del jugo clarificado(kcal/kg K)	0,911	0,907	0,909	0,908	0,906	0,906	0,909	0,910	0,907	0,907
EPE(concentración)(°C)	0,380	0,380	0,380	0,380	0,380	0,380	0,380	0,380	0,380	0,380
EPE(hidroestático)(°C)	0,766	0,886	0,900	0,940	0,894	0,766	0,870	0,900	0,870	0,884
EPE(hidrodinámico)(°C)	1,300	1,300	1,300	1,300	1,300	1,300	1,300	1,300	1,300	1,300
EPE(total)(°C)	2,446	2,566	2,580	2,620	2,574	2,446	2,550	2,580	2,550	2,564
Temperatura de salida del jugo clarificado(°C)	131,176	128,066	124,360	122,850	124,650	131,176	125,820	124,360	125,820	125,534
Agua evaporada en el Preevaporador(kg/h)	20780,670	21100,332	23597,503	43780,547	15499,578	14841,507	28674,278	28752,397	27840,759	38794,054
Consumo de vapor en el Preevaporador(kg/h)	29518,530	28788,118	29614,763	54178,208	21927,399	23041,037	35960,486	38623,212	37055,685	48750,058
Consumo de vapor en el Preevaporador(kg/t CM)	175,793	146,418	216,235	212,278	120,090	122,843	196,393	150,727	179,875	191,010

Balance de energía en el Múltiple Efecto										
Resultado	Día 1	Día 2	Día 3	Día 4	Día 5	Día 6	Día 7	Día 8	Día 9	Día 10
Meladura(kg/h)	34013,173	35282,370	24695,061	48979,859	34790,401	35274,582	35388,411	46240,284	41718,139	44715,888
Brix de la meladura(*Bx)	67,000	66,400	68,800	66,900	60,000	65,000	60,800	62,800	65,210	64,200
Agua evaporada total(kg vapor/h)	99184,712	95743,882	69694,951	131061,490	81825,469	95000,864	83814,658	121614,620	109417,408	110460,329
Demanda de vapor en el calentador 1(kg vapor/h)	6110,735	6508,696	5169,360	8712,038	6075,772	6482,666	5593,926	7956,731	6614,748	6832,210
Demanda de vapor en el Múltiple Efecto(kg vapor/h)	27851,545	27190,318	20008,417	37121,392	23494,253	26991,549	23750,628	34382,020	30661,726	31031,187
Demanda de vapor en el Múltiple Efecto(kg vapor/t CM)	140,780	137,438	101,136	187,636	118,756	136,433	120,051	173,790	154,985	156,852

3. Datos para la confección de la curva de referencia de determinación de almidón en jugos y azúcar crudo.

Curva de almidón en jugos		Curva de almidón en azúcar crudo	
Absorbancia (nm)	Concentración de almidón (mg/50ml)	Absorbancia (nm)	Concentración de almidón (mg/kg)
0	0	0	0
0,4436	1,6	0,032	50
0,671	2,4	0,078	100
0,8633	3,2	0,162	200
1,0883	4	0,246	300
		0,336	400
		0,417	500

4. Datos de absorbancia obtenidos para determinar la concentración de almidón en jugos y azúcar crudo.

Días	Absorbancia (nm)									
	JP	JD	JM	JA	JC	JF	M	Miel A	Miel B	AC
1	0,322	0,080	0,110	0,091	0,087	0,083	0,479	0,164	0,276	0,312
2	0,146	0,078	0,130	0,119	0,119	0,137	0,398	0,161	0,225	0,201
3	0,256	0,123	0,135	0,147	0,126	0,240	0,491	0,163	0,273	0,222
4	0,092	0,091	0,153	0,095	0,127	0,262	0,505	0,269	0,387	0,249
5	0,071	0,038	0,111	0,073	0,115	0,375	0,431	0,273	0,387	0,258
6	0,175	0,116	0,177	0,173	0,173	0,360	0,701	0,267	0,366	0,229
7	0,370	0,086	0,135	0,158	0,121	0,177	0,432	0,265	0,264	0,266
8	0,331	0,124	0,177	0,152	0,139	0,152	0,461	0,168	0,283	0,275
9	0,260	0,122	0,173	0,154	0,139	0,359	0,387	0,161	0,249	0,280
10	0,178	0,084	0,168	0,169	0,132	0,374	0,435	0,158	0,263	0,265

5. Resultados de las determinaciones de almidón en las corrientes analizadas en el proceso.

Días	Concentración de almidón (mg/L)									
	JP	JD	JM	JA	JC	JF	M	Miel A	Miel B	AC
1	1628,7	572,1	649,5	557,5	532,7	566,8	651,1	366,1	558,7	375,3
2	722,4	574,3	790,0	730,2	712,8	948,3	544,6	368,1	468,1	244,9
3	1323,7	1175,0	828,7	856,8	809,3	1533,5	650,2	358,9	564,9	269,4
4	432,5	644,3	925,4	587,8	802,6	1765,7	687,9	617,4	816,3	300,6
5	332,6	261,0	693,2	443,0	670,3	2660,7	653,4	616,7	788,1	311,7
6	836,3	833,2	1074,0	1085,9	1025,2	2514,9	986,0	607,2	764,3	277,2
7	1781,3	569,2	791,3	974,8	767,7	1219,1	646,3	596,2	551,1	321,2
8	1568,9	908,5	1066,8	881,3	874,1	998,8	668,3	388,3	582,9	331,80
9	1224,6	908,3	1015,8	942,6	850,7	2387,4	539,0	364,5	515,9	337,7
10	832,7	591,4	997,9	1075,0	826,6	2533,3	616,4	353,8	543,6	319,9

6. Valores de los coeficientes de skewness y kurtosis de las concentraciones de almidón en cada corriente.

Corrientes	Coeficiente de skewness	Coeficiente de kurtosis
Jugo Primario	-0.05185	-0.91786
Jugo Diluido	0.30889	0.26656
Jugo Mezclado	-0.21394	0.95013
Jugo Alcalizado	-0.55460	-0.74151
Jugo Clarificado	-0.32028	0.86181
Jugo Filtrado	-0.08415	-1.10334
Meladura	2.8958	3.96761
Miel A	0.61228	1.44667
Miel B	1.05305	-0.68315
Azúcar Crudo	-0.09060	0.03489

7. Valores del contenido de dextrana reportados en el laboratorio del central.

Contenido de dextrana en (ppm)										
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Promedio
700	710	677	671	620	673	675	672	670	221	668,9

8. Valores para la construcción del gráfico de consumo de vapor en los calentadores contra las corriente de jugo mezclado + jugo filtrado.

Flujos de almidón en jugo mezclado + jugo filtrado (kg/h)	Consumo de vapor en los calentadores primario, secundario y rectificador (kgv/TCM)
109,6572671	73,045
135,23822	79,580
131,4962811	70,893
220,8009	103,915
133,3392956	73,883
193,40155	76,757
133,3388789	73,039
234,7555452	103,471
203,600487	81,658
232,4253972	99,185

9. Valores para la construcción del gráfico de consumo de vapor en el calentador de jugo clarificado, los preevaporadores y el múltiple efecto contra el jugo clarificado.

Flujos de almidón en jugo clarificado (kg/h)	Consumo de vapor en el calentador de jugo clarificado, preevaporador y múltiple efecto (kgv/TCM)
94,327	325,020
113,500	289,568
92,373	323,486
195,447	408,061
86,657	247,192
110,234	323,572
197,826	329,464
171,199	340,127
182,749	354,270