

UCLV
Universidad Central
"Marta Abreu" de Las Villas



FQF
Facultad de
Química y Farmacia

Departamento de Ingeniería Química

TRABAJO DE DIPLOMA

Título: Influencia del P_2O_5 , Calcio, Insolubles y floculante en la sedimentación de jugo de caña en un clarificador de simple bandeja (BTR).

Autor: Magda Migdaly Ortiz Roque

Tutores: Dr. C.Ing.Luis Alberto Gómez Rodríguez

MS.c.Ing.Enrique Pérez Borroto

Santa Clara, Junio, 2021
Copyright©UCLV

UCLV
Universidad Central
"Marta Abreu" de Las Villas



FQF
Facultad de
Química y Farmacia

Departament of Chemical Engineering

DIPLOMA THESIS

Title: Influence of P₂O₅, Calcium, Insolubles and flocculant in the sedimentation of cane juice in a simple tray clarifier (BTR).

Author: Magda Migdaly Ortiz Roque

Thesis Dr. C.Ing.Luis Alberto Gómez Rodríguez
MS.c.Ing.Enrique Pérez Borroto

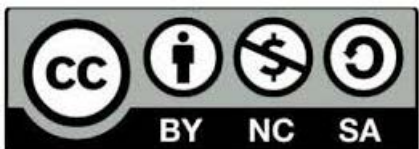
Santa Clara

Copyright © UCLV
, Junio, 2021

Este documento es Propiedad Patrimonial de la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, y se encuentra depositado en los fondos de la Biblioteca Universitaria “Chiqui Gómez Lubian” subordinada a la Dirección de Información Científico Técnica de la mencionada casa de altos estudios.

Se autoriza su utilización bajo la licencia siguiente:

Atribución- No Comercial- Compartir Igual



Para cualquier información contacte con:

Dirección de Información Científico Técnica. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas. Carretera a Camajuaní. Km 5½. Santa Clara. Villa Clara. Cuba. CP. 54 830

Teléfonos.: +53 01 42281503-1419.

Pensamiento

“La recompensa de nuestro trabajo no es lo que obtenemos, sino en lo que nos convertimos”.

Paulo Coelho.

Dedicatoria

El presente trabajo de diploma está dedicado a:

Primeramente a mi madre y a mi padre, que son lo más importante en mi vida, por haber sido los principales protagonistas en estos largos años de estudios.

Mi abuela y mi hermano, que siempre me brindaron todo su apoyo para poder lograr mis objetivos.

Todos mis familiares que se vieron involucrados de una forma u otra durante el trayecto de mi formación.

Mi novio por estar ahí en cada momento difícil y darme el aliento necesario para seguir adelante.

Mis amigos por su preocupación, su apoyo, por brindarme alegrías en los momentos de tristeza y compartir mis momentos de felicidad.

Agradezco:

El presente Trabajo de Diploma marca la culminación de una etapa de formación académica y el inicio de una vida profesional como ingeniero químico, cuyo desarrollo no hubiese sido posible sin la colaboración de un grupo de personas que me apoyaron y creyeron en mí:

A mi madre y a mi padre que con su esfuerzo y apoyo incondicional fue posible terminar todos estos años de estudios.

A toda mi familia, que siempre estuvo atenta por la culminación de mis estudios.

A mi novio que siempre estuvo a mi lado apoyándome durante estos años de universidad. A mi tutor Dr. C.Ing.Luis A. Gómez Rodríguez, por toda su ayuda y paciencia, que sin él no hubiera sido posible la realización de este trabajo.

A todo el personal del central azucarero Abel Santamaría, especialmente al MS.c.Ing.Enrique Pérez Borroto, por acogerme y ayudarme en la realización de este trabajo.

A los compañeros de aula que siempre estuvieron en los momentos difíciles y de alegría.

A todos los profesores de la Universidad de Villa Clara “Marta Abreu” que contribuyeron a mi formación profesional y me brindaron su ayuda.

A todos aquellos que de una forma u otra colaboraron con la terminación satisfactoria de este trabajo de diploma.

A todos ellos muchas gracias.

Resumen

La investigación desarrollada en la UEB Central Azucarero Abel Santamaría, ubicado en el municipio de Encrucijada, en la provincia de Villa Clara, tiene como objetivo general la realización del análisis de la sección de purificación del proceso de producción de azúcar crudo, con las variaciones de la calidad de la materia prima, la composición de sus jugos, el empleo de floculante y de un clarificador de una sola cámara (BTR). Para lograr este propósito se lleva a cabo una caracterización de los jugos que se procesan en conjunto con el subproceso de extracción, se analizan las variables que inciden en dichas etapas a través de estudios de laboratorio y balances del proceso, lo que permite evaluar los resultados que presentan dichos parámetros en cada una de las variables analizadas, se desarrolló una metodología para el cálculo de los balances de masa y para las pérdidas de sacarosa aparente (Pol), por inversión, en el clarificador, así como su efecto económico.

Palabras Claves: Jugo de caña, Purificación, Clarificación, Velocidad de Sedimentación, Área de Sedimentación, Pérdidas de Sacarosa por Inversión, Clarificador de Simple Bandeja.

Summary

The general objective of the research carried out at the Abel Santamaría Central Azucarero UEB, located in the municipality of Encrucijada, in the province of Villa Clara, is to carry out the analysis of the purification section of the raw sugar production process, with variations in the quality of the raw material, the composition of its juices, the use of flocculant and a single chamber clarifier (BTR). To achieve this purpose, a characterization of the juices that are processed in conjunction with the extraction sub-process is carried out, the variables that affect these stages are analyzed through laboratory studies and process balances, which allows evaluating the results that present said parameters in each one of the analyzed variables, a methodology was developed for the calculation of the mass balances and for the losses of apparent sucrose (Pol), by investment, in the clarifier, as well as its economic effect.

Key Words: Cane Juice, Purification, Clarification, Sedimentation Rate, Sedimentation Area, Sucrose Losses by Inversion, Simple Tray Clarifier.

Índice

Introducción	1
Desarrollo.....	4
Capítulo 1. Revisión bibliográfica.....	4
1.1-La agroindustria azucarera.....	4
1.2- Aspectos Relativos al Proceso Tecnológico Azucarero.....	6
1.3- Calidad de la caña de azúcar.....	8
1.4- Composición de la caña de azúcar y de los sólidos del jugo.....	10
1.5- Extracción física del jugo de caña.....	13
1.6- Purificación del jugo de caña.....	14
1.7- Proceso de filtración del lodo.....	25
1.8- Proceso de concentración del jugo.....	26
1.9- Proceso de cristalización del azúcar.....	26
1.10- Conclusiones parciales.....	29
Capítulo 2. Etapa de purificación: Vías para su intensificación y cálculos ingenieriles.....	30
2.1- Descripción de la etapa de purificación de los jugos de caña en el Central Azucarero Abel Santamaría.....	30
2.2- Materiales utilizados en la purificación del jugo de caña.....	32
2.3- Vías para intensificar la purificación.....	34
2.4-Esquema de flujo de las etapas de molienda de la caña y purificación del jugo mezclado en la Empresa Azucarera Abel Santamaría.....	36
2.5- Proceder para el cálculo de balances de masa.....	37
2.6-Metodología para la determinación de las pérdidas de sacarosa por inversión (%sacarosa invertida/hora) y su costo en el clarificador BTR para su operación con y sin floculante, según corresponda, como alternativas a evaluar.....	44
2.7- Elaboración de cartas de control.....	47
2.8- Conclusiones parciales.....	48
Capítulo 3: Análisis de los resultados.....	49
3.1- Análisis estadístico de las variables empleadas.....	49
3.2- Conclusiones parciales.....	58
Conclusiones.....	59
Recomendaciones.....	60
Bibliografía.....	61
Anexos	63

Introducción

En Cuba, la agroindustria azucarera forma parte de nuestra cultura, nuestra historia y es un factor esencial para el desarrollo económico del país. Una de las principales condiciones para desarrollar y perfeccionar la industria azucarera es la investigación sistemática que permita la introducción de nuevas tecnologías, sistemas y métodos que conduzcan a aumentar la producción con alta calidad y mayor eficiencia para satisfacer las exigencias rigurosas de los clientes.

El proceso de producción de azúcar cuenta con varias etapas, en las cuales se necesita de un estricto control para que se obtenga el producto final con la máxima calidad requerida, uno de los principales subprocesos que hacen posible lo antes mencionado es la purificación del jugo mezclado. Este proceso es complejo ya que depende de la eficiencia y calidad con que se hayan realizado las operaciones anteriores, es primordial para una buena operación de purificación trabajar con jugos de calidad, lo que significa procesar jugos de caña frescos, con un contenido de fósforo que permita su clarificación, con bajo contenido de no azúcares y poca cantidad de sólidos en suspensión. Se encarga de eliminar aquellas sustancias indeseables tales como el bagacillo, la tierra y un conjunto de no azúcares presentes en el guarapo, sometiéndolo a diversos procesos de alcalización, calentamiento, clarificación y filtrado, al menor costo y con el mínimo de pérdidas en azúcar.

Es por ello que la purificación constituye hoy una de las etapas que se prioriza en la implementación de nuevas tecnologías para el mejoramiento en el proceso de producción, específicamente se ha mostrado especial interés en el área de clarificación, esto se debe a que es el proceso inicial por el cual son eliminadas todas las impurezas contenidas en el jugo que son susceptibles a coagulación y floculación por medios mecánicos y químicos, que implican el asentamiento y remoción por decantación de las mismas, para producir un jugo claro de buena calidad con la ayuda conjunta de la cal, el calor y la adición de floculante, (Aparicio, 2005).

Es importante destacar que la clarificación de bajo tiempo de retención necesita del uso de floculantes para que el tiempo de clarificación del jugo sea el mínimo posible con el objetivo de evitar la inversión de la sacarosa, manejar mayores volúmenes de jugo en un

menor tiempo, y sobre todo obtener un jugo claro y brillante con la calidad requerida, (Lamasares, 2010).

Para ello la empresa tuvo como propósito invertir e instalar en el año 2011 un nuevo clarificador de bajo tiempo de retención, el cual logra completar el proceso de sedimentación entre 0.5 – 0.75 horas, valores muy favorables en comparación con la tecnología antigua en la que intervenían clarificadores convencionales. No obstante actualmente la etapa de purificación en esta industria azucarera se encuentra afectada pues existen diversos parámetros (Brix, Pol, pH) que en ocasiones no cumplen con las normas de calidad requeridas, además, se conoce que el jugo que sale del clarificador trae consigo muchas impurezas debido a que no está sedimentada toda la materia extraña, incidiendo en la calidad de los jugos provenientes de los filtros donde existe una gran cantidad de sólidos totales no disueltos.

Lo antes expuesto permite formular como **Problema Científico:** “La necesidad de establecer características y parámetros operacionales en la sedimentación de jugos de caña en un clarificador de Simple Cámara, con o sin la aplicación de floculante, ante las variaciones de la calidad de la materia prima (caña) procesada y la composición de sus jugos”.

Hipótesis: A partir del conocimiento de la calidad de la materia prima sometida a molida y de la composición en P₂O₅, Calcio, e Insolubles en el jugo Alcalizado, alimentado a un clarificador de Simple Cámara, con o sin la adición de Floculante, es posible establecer, sus mejores parámetros operacionales y dimensiones del equipo a utilizar, así como el comportamiento del tiempo de Residencia del jugo, requerido y evaluar las Pérdidas de Sacarosa por inversión y su costo, en este equipo.

Objetivo General: Evaluar el comportamiento del dimensionamiento, y de las variables operacionales que intervienen en la sedimentación de los jugos de caña, cuando varía su composición, con o sin floculante, en un clarificador de Simple Cámara (BTR).

Objetivos específicos:

1. Realizar la búsqueda bibliográfica para el desarrollo de la temática.
2. Estudio del comportamiento de los principales parámetros del área de clarificación.

3. Realizar estudios estadísticos del comportamiento, a diferentes variables mediante el uso de cartas de control.
4. Realizar balances de masa y balances técnicos-económicos en la evaluación del comportamiento de la operación en el clarificador de simple cámara (BTR).

Principales métodos, técnicas y herramientas utilizadas:

Para cumplimentar el objetivo general y los objetivos específicos se realizaron muestreos y pruebas de sedimentación a escala de laboratorio y se utilizaron diferentes técnicas y métodos analíticos, propios de la Tecnología Azucarera y la estimación de propiedades, para la determinación de los parámetros involucrados.

Mediante los Balances de Masa Total y Parcial se determinaron las principales corrientes del proceso lo que unido a la revisión de documentos, y procedimientos computacionales, y tratamientos estadísticos entre otras herramientas, permitió evaluar la etapa de purificación y el dimensionamiento del Clarificador de Simple Cámara (BTR), en la UEB Abel Santamaría.

La investigación está estructurada de la manera siguiente:

1. **Capítulo I.** Marco teórico referencial: en él se abordan los fundamentos teóricos acerca del proceso de producción de azúcar, las variables que inciden en el proceso y sus valores normados, mediante una búsqueda bibliográfica actualizada sobre autores de los últimos tiempos.
2. **Capítulo II.** Se realiza la caracterización del proceso azucarero de la UEB Abel Santamaría, las vías para intensificar la etapa de purificación en el mismo y se establece la metodología de cálculos ingenieriles aplicados a distintos parámetros.
3. **Capítulo III.** Se analiza el comportamiento de los principales parámetros operacionales, considerados fundamentales en el área de purificación. Para ello se estudian las cartas de control y se dan conclusiones parciales sobre el tema tratado.
4. **Conclusiones y recomendaciones.**
5. **Referencias bibliográficas y anexos.**

Desarrollo

Capítulo 1. Revisión bibliográfica

En el presente capítulo se expondrán los fundamentos teóricos reportados en la literatura científica que sustentan la investigación que aborda el tema de tesis referido a la producción de azúcar crudo principalmente en la etapa de purificación de la UEB Central Azucarero Abel Santamaría.

1.1-La agroindustria azucarera.

La agroindustria azucarera, como sistema socio-ecológico, es una de las empresas más importantes en el mundo, de alto impacto social, económico y espacial por la obtención de un producto básico para la alimentación humana de alta calidad y pureza, además de la diversificación del uso de la caña de azúcar y subproductos de procesamiento como biorefinerías y por su contribución con la generación de empleo especialmente en áreas rurales, con el desarrollo sostenible y las economías nacionales. Sin embargo, el aumento progresivo de los costos de producción de campo, cosecha y fabricación de azúcar en el sector azucarero, los retos de competitividad global, regional y local (productividad, diversificación, innovaciones, gestión, servicios ambientales, I+D+I etc.), diversificación y reconversión productiva en centrales o ingenios azucareros, destilerías y unidades de producción cañera y los impactos ambientales en suelo, aire y agua de esta agroindustria, hacen necesaria la búsqueda de nuevas alternativas de producción eficaz, de nuevo conocimiento y el desarrollo de nuevas tecnologías que contribuyan significativamente a su sostenibilidad, (Aguilar-Rivera et al., 2015)

1.1.1- Situación actual de la agroindustria azucarera cubana. Perspectivas de desarrollo.

En Cuba la Agroindustria Azucarera es considerada una de las actividades económicas más importantes proporcionándole una fuente significativa de ingresos en divisas al país, facilitando su desarrollo, además brinda empleo a más de 600 mil trabajadores en toda la isla, (Morejón, 2013)

El sector azucarero es sin lugar a dudas el más importante de la producción agroindustrial cubana. La agroindustria de la caña de azúcar en Cuba tiene más de cuatrocientos años, pues empezó en el siglo XVII; sin embargo, a finales del siglo XVIII comenzó a tener un

auge que cobró mucha más fuerza a inicios del siglo XIX debido a las rebeliones de esclavos en el Caribe que devastaron parte de la industria azucarera en esas islas. Las exportaciones cubanas de azúcar y de algunos derivados se movieron entre el 70% y el 85 % del total de sus exportaciones desde mediados del siglo xix hasta casi finales del siglo xx, (Morales, 2014).

La crisis económica de los años noventa impactó desfavorablemente a la agroindustria azucarera cubana, a lo cual se suma una baja de los precios del azúcar en el mercado internacional en esos años, afectando la capacidad financiera del país.

Para atenuar los efectos del déficit de recursos materiales y buscando disminuir los costos de mantenimiento, se elabora una estrategia denominada "Plan de Rehabilitación", donde:

1. Se aumenta la preparación de caña en los centrales con la introducción de machetes Zuazagas, Baguera y Perret que desfibran la caña, aumentando de un 50% de celdas rotas a un 75%.
2. Se automatizan la alimentación de caña a plantas moledoras, para lograr la estabilidad del proceso tecnológico.
3. Se montan tolvas Donnelli para obtener alimentación forzada en los molinos, aumento de la eficiencia y capacidad.
4. Se aplica aspereza transversal en las masas superiores de todos los molinos, disminuyendo el desgaste de masas y eliminando el rayado helicoidal de las mismas.
5. Se eliminan las desmenuzadoras, lográndose disminuir la potencia instalada en 20,5 MW.
6. Se automatiza la limpieza con vapor en plantas de moler, para disminuir las pérdidas de azúcar por infección en molinos.
7. Se modifican clarificadores instalados y se montan otros de bajo tiempo de residencia.
8. Se disminuye la existencia de masas de tercera por medio de la modificación de cristalizadores por varias vías:
 - a) Aumento de velocidad del sistema de enfriamiento.
 - b) Cambio del sistema de enfriamiento por agua al de aire.
 - c) Introducción de cristalizadores verticales.
9. Modificación en la alimentación de las centrífugas de tercera para aumentar su eficiencia y capacidad.

Desde hace varios años en nuestro país se trabaja por incrementar la producción de caña a partir del alza de los rendimientos agrícolas y la renovación de las áreas. Se concentran esfuerzos en las inversiones para aumentar de 9 % a 27 % las plantaciones bajo riego, y por elevar y perfeccionar los servicios a productores en variedades, semillas, técnicas agrícolas, entre otras atenciones necesarias, (Morejón, 2012).

Si se analiza la situación actual de Cuba, todos los expertos del sector concuerdan que el principal problema es lograr aumentar la producción de caña de azúcar, pues de una producción de poco menos de veinte millones de toneladas de la gramínea que se producen, se debe llegar, de acuerdo con los planes del antiguo MINAZ (hoy empresa AZCUBA), a cerca de cuarenta millones de toneladas en menos de diez años. La forma de lograr este objetivo es, fundamentalmente, aumentando los rendimientos de la caña por área, que están en cifras muy bajas y solo con lograr aumentar un promedio de 50 t caña/hectárea se alcanzan estos objetivos.

1.1.2- Influencia del proceso agrícola en la eficiencia económica de la agroindustria.

La agricultura en el proceso azucarero constituye el factor más importante que tiene el proceso para la producción ya que en la misma se encuentra la materia prima que es la encargada de una parte de la calidad y el rendimiento del azúcar, (Marichal, 2006).

Arronte, (1996) citado por (Morejón, 2013) plantea que la preparación de la caña a moler es un aspecto de gran importancia por su efecto cuantitativo y cualitativo como proceso, dado que al aumentar la densidad del colchón de la caña mejora la capacidad de molido y al abrirse la celda del jugo se facilita la extracción por compresión en los molinos.

1.2- Aspectos Relativos al Proceso Tecnológico Azucarero.

A nivel internacional se conoce la existencia de dos tipos de productos que se emplean ampliamente para lograr el sabor dulce en la elaboración de alimentos; la Sacarosa (azúcar de origen natural) y los llamados Edulcorantes sintéticos. La Sacarosa a su vez es obtenida fundamentalmente a partir de dos materias primas naturales; la Remolacha Azucarera (fundamentalmente en Europa) y la Caña de Azúcar (en América y Asia). En nuestro país la producción del azúcar se conduce a partir de la Caña, siendo su procesamiento industrial uno de los procesos químico tecnológico más difundido a lo largo de todo el territorio, principalmente el destinado a obtener Azúcar Crudo.

En la figura 1.1 se distinguen estadíos característicos del Proceso Tecnológico Azucarero, así como importantes cualidades que se asocian como consecuencia de las transformaciones a las que se somete la Materia Prima original para alcanzar entonces el producto final. De aquí se distinguen, además de la Caña de Azúcar y el Azúcar Crudo como cualidades extremas, otras que pueden disponer de importantes aplicaciones o considerarse fuente potencial para la obtención de los llamados derivados, las cuales no pueden excluirse de cualquier análisis al que es sometido dicho proceso tecnológico en su conjunto. Del mismo modo, en la figura 1.1 se pueden identificar cinco macroetapas del Proceso Azucarero Básico a través de las cuales podemos desarrollar la interpretación y descripción del mismo.

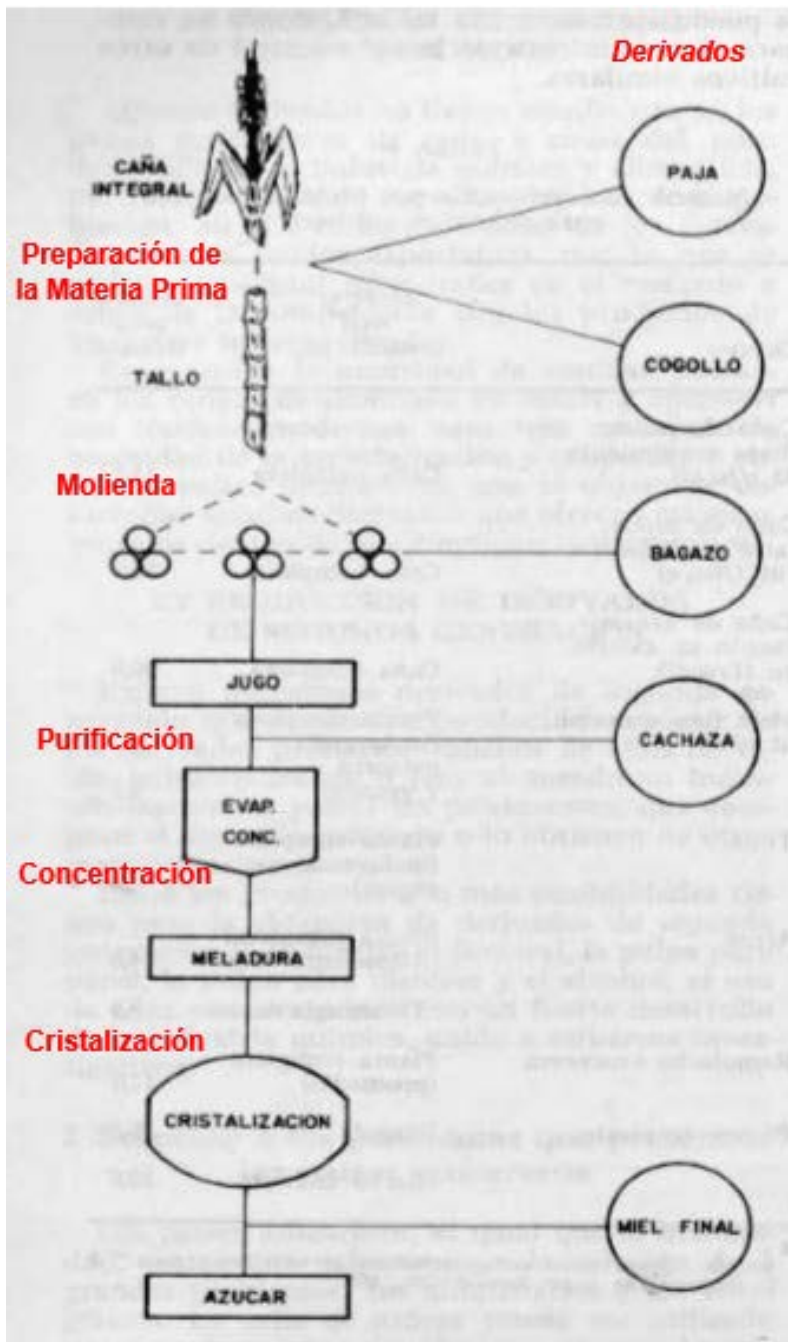


Figura 1.1: Componentes fundamentales de la Industria Azucarera.(López, 2004).

1.3- Calidad de la caña de azúcar.

El manual para la autogestión de aprendizaje por competencia, (2011) plantea que la caña de azúcar es una planta que concentra en su tallo grandes cantidades de sacarosa. Estas proporciones de azúcar dependen de diversos factores tales como: la variedad, la disponibilidad de nutrientes, la madurez y el tiempo de cosechada. Por tanto, para cosechar

la caña se define una estrategia o programación de corte, la cual tiene como base el tipo de variedad, calidad de la cepa, edad óptima, y sobre todo la madurez.

Resulta importante evaluar parámetros como la frescura y el índice de materias extrañas, dada las consecuencias que traen para el proceso.

Frescura: Se define como el tiempo que transcurre desde el momento en que se corta la caña y el momento en que entra en el proceso fabril. Cuando existen intervalos de tiempo prolongados entre cosecha y procesamiento, se manifiesta un deterioro en los jugos introduciendo altos % de dextrana.

Materias extrañas: Se define como todo aquello que no es el tallo sano de la caña de azúcar, tales como: la paja, el cogollo, retoños, tallos enfermos o deteriorados, así como, la tierra y otros materiales. Se trata de sustancias no azúcares que pasan al jugo mezclado y que afectan el proceso.

Según (Marín, 2012) la caña de azúcar, la composición química de su jugo y el azúcar que se produzca dependen de factores que van más allá del mismo proceso de extracción en fábrica.

A opinión del autor, es importante señalar que la calidad de los jugos está influenciada por las características de los suelos, la cantidad y la calidad de la fertilización durante el cultivo, de la madurez de la caña, del tiempo transcurrido después del corte, de los microorganismos presentes en la planta y de la cantidad de materia extraña que entre a fábrica, todo lo cual se expresa en los análisis de brix, pol, pureza, no azúcares, acidez, dextrana y pH principalmente.

Una caña con calidad debe responder a los parámetros de calidad del jugo que aparecen a continuación en la tabla 1.1:

Tabla 1.1 Parámetros de calidad del jugo.

Parámetros	Valores normales
Materias extrañas en basculador	< 5.0 %
PH del jugo	> 5. 2
Dextrana % Brix	< 0.08 %
Fermentación espontánea	< 0.40 %
Capacidad buffer	< 0.03
Polisacáridos % Brix.	< 0.25 %

% de goma Hidro alcohólica	< 5.0 %
% de volumen de tierra	< 5.0 %

Fuente: Manual de Operaciones para la fabricación de azúcar crudo, (2005).

1.4- Composición de la caña de azúcar y de los sólidos del jugo.

Cuando la caña está en el proceso de crecimiento los entrenudos son pobres en sacarosa y ricos en no azúcares, mientras que en los entrenudos inferiores se acumula la mayor cantidad de sacarosa. Cuando la caña está madura la riqueza en sacarosa del tallo tiende a igualarse en todos sus entrenudos, de ahí, la expresión tan empleada: cortar bien arriba y bien abajo, sin caña en el cogollo ni cogollo en la caña (Batule, 2009).

La caña de azúcar está compuesta básicamente por fibra vegetal (bagazo) y jugo (azúcares y no azúcares), en la tabla 1.2 se indican sus componentes básicos.

Tabla 1.2 Composición de la caña de azúcar.

Componentes	Valores medios %
Azúcares totales	10.0 a 15.0
Fibra en caña	11.0 a 16.0
Agua	70.0 a 75.0
Sales	≈ 0.5
Cuerpos nitrogenados	≈ 0.4
Ceras, grasas y ácidos	≈ 0.6

Fuente: Manual de Operaciones para la fabricación de azúcar crudo, (2005).

En la Industria Azucarera Cubana se ha defendido un patrón de control de calidad del azúcar a partir de evaluar de forma directa el parámetro y compararlo con las especificaciones técnicas de la figura 1.1.

Tipo de Azúcar	Pol (°S)		Color (UCH)		Insolubles (%)		T.Grano (%)		Humedad (%)	
Crudo estándar	97.80	95.00	30.0	95.00	0.06	80.00	65.0	80.00	0.50	95.00
Consumo doméstico	99.00	95.00	10.0	95.00	0.06	80.00	65.0	80.00	0.30	95.00
Afinado	99.00	95.00	10.0	95.00	0.06	80.00	65.0	80.00	0.30	95.00
Alta calidad	98.50	95.00	20.0	95.00	0.06	80.00	65.0	80.00	0.40	95.00

Figura 1.2 Especificaciones de calidad de los diferentes azúcares crudos producidos en Cuba y porciento de cumplimiento.

Especificaciones: En la columna en que aparecen los números en negritas se indican las metas de calidad en % para cada parámetro. El tamaño del grano es bajo la especificación de malla Tyler No 20. Los indicadores color, insolubles y humedad se consideran como valores máximos. El indicador pol se considera siempre mínimo.

De la comparación se obtiene el concepto de meta de calidad, el cual ofrece una medida clara de la estabilidad de la fábrica para cumplir ciertos patrones pues en él se considera solo el porciento de las mediciones que logran cumplir con sus especificaciones, así por ejemplo cuando se plantea que determinado parámetro se cumplió al 95 %, se está indicando que solamente un 5 % de las mediciones del día están fuera de la norma.

1.4.1- Acción microbiana en la caña de azúcar y en el jugo.

Se ha comprobado que los microorganismos atacan con mayor facilidad a la caña cuando se emplea corte mecánico en su extracción, sobre todo si las cuchillas no se encuentran alineadas o afiladas, porque tienen más puntos de contacto, (Marín, 2012)

Generalmente las bacterias *Leuconostoc Mesenteroides* (Ver Figura anexo 1) originan polisacáridos como las dextranas (constituidas por unidades de glucosa con enlaces 1-6) que emplean la sacarosa como materia prima, que aumentan las pérdidas de la misma en fábrica y la viscosidad de los jugos, elevando erróneamente el valor de la pol, provocan pérdidas de sacarosa en mieles y agua de lavado a causa de la elongación de los cristales de sacarosa conocidos como cristal aguja.

La multiplicación de los microorganismos en los jugos diluidos extraídos de la caña de azúcar y su acumulación en la superficie de los molinos, dan como resultado una pérdida

considerable de la sacarosa. Por lo tanto, los microorganismos contribuyen a la pérdida de rendimiento de azúcar de dos maneras:

1. Incuestionablemente son la principal fuente de invertasa en el jugo de caña.
2. La transferencia de energía requerida para que la reacción siga avanzando hacia la destrucción de azúcar y pérdidas para el ingenio, es generada por microorganismos que utilizan la energía obtenida de la inversión de sacarosa para su crecimiento y reproducción. (Morrell, 1985) plantea que ciertas especies de bacterias producen una enzima, la invertasa y que concentraciones bien pequeñas de ésta enzima transforma rápidamente a la sacarosa en glucosa y fructosa. Los fangos que se acumulan en los molinos constituyen la fuente más importante de invertasa, y aunque la limpieza frecuente de los fangos ayuda a reducir las pérdidas de sacarosa no hay duda que la rápida multiplicación de los microorganismos en un nutriente tan rico como el jugo de caña hace impracticable la eliminación de los fangos que se forman en los molinos y por consiguiente las pérdidas de sacarosa.

A criterio del autor, la deterioración microbiológica, sea en el campo, ingenio o refinería produce polisacáridos que reducen los rendimientos de extracción y cristalización, aumentan la viscosidad y disminuyen los niveles de producción mientras producen así mismo componentes coloreados y formadores de ácidos. Todos estos componentes no azucarados tienen que eliminarse durante el proceso, ya que arrastran sacarosa con ellos, significando la pérdida de un porcentaje de azúcar como producto final.

1.4.2- Microorganismos presentes en la caña de azúcar.

Dextrana: Es un enemigo muy molesto para el fabricante de azúcar, es el producto de varias fermentaciones (como la producida por el *Leuconostoc*), y ocurre con frecuencia en cañas dañadas por heladas o por ataques de insectos. La formación de esta goma viscosa, convierte rápido la caña en inservible para la molienda.

Levan: Esta goma la encontró Smith y Steel en productos de caña de Australia, y era producido por la bacteria *Levaniformans*. Este organismo es, según las investigaciones, muy destructor de los azúcares crudos, causa rápidas inversiones de la sacarosa y produce la goma mucilaginosa levan, que hidrolizada con ácidos presenta un rendimiento positivo.

Cellulan: Encontrada por Brawne. Se forma por ciertas fermentaciones de jugos y de meladuras, y consta de grumos correosos grandes.

Mannan: Esta goma se encuentra a veces en los depósitos sedimentarios de jugos y mieles fermentadas, y el cual, hidrolizada por ácidos produce Manosa.

Chitina: Esta sustancia, que estrictamente hablando no pertenece a las gomas, ha sido encontrada por Brawne en grandes cantidades en las espumas de las mieles de tanques de almacenamiento.

1.5- Extracción física del jugo de caña.

(Cruz, 2007) plantea que la función principal de esta etapa es lograr la mejor separación de los dos elementos de la caña, la fibra y el jugo. La molienda se efectúa en un tándem de 4 a 6 molinos, cada uno de los cuales realiza una extracción. Uno de los factores más importantes para el desempeño de los molinos es la ubicación correcta de las tolvas de alimentación y salida, el ángulo de caída del bagazo a la entrada debe ser de por lo menos 50°, la longitud de la tolva de entrada es de aproximadamente 5 pies. Se puede mejorar la alimentación del molino al aumentar esta longitud.

La extracción del jugo moliendo la caña entre pesados rodillos o mazas constituye la primera etapa del procesamiento del azúcar crudo, primero, la caña se prepara para la molienda mediante cuchillas giratorias que cortan los tallos en pedazos pequeños y mediante molinos de martillo se desmenuzan, para luego proceder a la extracción del jugo, (Aparicio, 2005).

Según (Caballero, 2013) al jugo extraído de los molinos se le aplica una serie de mecanismos capaces de facilitar el proceso de producción.

Imbibición: Se utiliza para mejorar la separación del jugo en la etapa de molienda. Esta tiene como objetivo extraer parte del azúcar que queda retenida en el bagazo, que no se puede extraer por presión seca. Puede efectuarse con agua o con jugo diluido, también se puede realizar con agua fría o caliente, esta última dificulta el agarre del bagazo y disuelve la cera que ocasiona dificultades. La cantidad de agua utilizada en la imbibición varía según la región, la capacidad de los molinos y la fuerza motriz del tren de molienda.

Maceración: Es el proceso que se aplica paralelo a la imbibición y que tiene la misma finalidad (aumentar la extracción). Consiste en remojar el bagazo con el jugo diluido producto de la imbibición. El jugo extraído por un molino se aplica a la entrada del molino anterior. En un tándem de 5 molinos se aplica maceración al segundo, tercero y cuarto molino, e imbibición al quinto molino.

Tratamiento químico: El jugo de caña es tratado químicamente tanto para regular el color final del azúcar, como para favorecer el proceso de clarificación (separación de impurezas). En la molienda se le agrega ácido fosfórico al jugo con el fin de que éste funcione como puente y propicie la reacción entre la materia orgánica y la Acril – Amida, que se agrega en una etapa posterior. El ácido fosfórico, en su forma de anión (PO_4)³⁻ está presente en el jugo crudo o mezclado formando diferentes sales, mayoritariamente inorgánicas, en un equilibrio tal que al añadir la lechada de cal en proporción adecuada se logra una reacción en la que se precipita en forma de fosfato tricálcico, según se describe en la ecuación siguiente :



El punto de balance se encuentra en el rango de 250 a 350 ppm de fosfórico expresado como P_2O_5 .

El jugo tratado químicamente recibe el nombre de jugo mixto.

Filtración: Para eliminar el bagacillo presente en el jugo extraído en la molienda se pasan primero por filtros perforados con agujeros de 1 mm de diámetro. La forma más común consiste en filtros horizontales fijos. Al pasar por el filtro el jugo se deposita en un tanque en tanto que el bagacillo que ha sido separado se recoge por medio de un conductor de raspador que lleva el bagacillo de nuevo a los molinos.

1.6- Purificación del jugo de caña.

(Morejón, 2012) opina en su informe técnico que la purificación de los jugos es el resultado del trabajo conjunto de muchos procesos unitarios. Cada uno de ellos es relevante porque permiten la eliminación de cierta cantidad de impurezas diferentes. De esta forma, la purificación del jugo comprende dos procesos elementales:

1. Purificación física: tiene lugar en los molinos, se extrae el jugo de la caña y se separan las impurezas de mayor tamaño como: bagazo, materia extraña y parte del bagacillo.
2. Purificación química: es la eliminación de las impurezas solubles, insolubles o coloidales a causa de las diferentes reacciones químicas entre los componentes del jugo y los insumos químicos que se adicionan para clarificarlo. El resultado de la purificación química es la coagulación y la floculación de las impurezas del jugo y la remoción de estas mediante la decantación de las mismas para obtener un jugo claro.

La etapa de purificación ocupa un lugar determinante dentro del proceso de obtención de la sacarosa. Su función principal es eliminar las impurezas y otros no azúcares presentes en el guarapo, por tanto condiciona la necesidad de un control muy efectivo sobre los parámetros q participan en ella, haciendo de esta área una de las más sensibles al aumento de las pérdidas y a la afectación de la calidad del azúcar.

La purificación del jugo de la caña comienza con la separación del material en suspensión por medio de un procedimiento de tamización. Además de la separación del bagacillo fino se efectúa una separación de la arena y de la arcilla que entran mediante la extracción del jugo en los molinos. En general, el tamizador más usado para la separación de la materia en suspensión en los molinos es el llamado colador de Cush o rastrillo de bagacillo, (Batule, 2009).

(Lamasares, 2010) plantea que la eliminación de los no azúcares debe lograrse, pero evitando la destrucción de los azúcares en cantidades apreciables, así como también debe evitarse la destrucción de azúcares reductores porque sus productos de reducción tienen efectos negativos tales como:

1. Aumento de coloración del azúcar.
2. Formación de sales solubles que producen incrustación en los equipos.
3. Aumento de pérdidas de sacarosa en la miel final.

(Domínguez, 2007) todos los elementos que conforman la estructura de la etapa de purificación, deben trabajar de forma armónica, para así garantizar establemente el cumplimiento de los parámetros básicos de operación, establecidos para las diferentes operaciones que se ejecutan en esta etapa tan compleja, para lo cual es necesario cumplir que:

1. Las capacidades de los diferentes equipos del área estén balanceados y ajustados al régimen de molienda horaria del central, a fin de lograr una explotación al máximo de eficiencia del equipamiento instalado y no tener equipos paralizados.
2. El flujo de jugo mezclado del proceso esté debidamente regulado (evitar las molidas picos).
3. La temperatura del jugo a la entrada de la estación de clarificación esté bajo estricto control, a fin de evitar posibles revolturas.
4. El pH del jugo clarificado se mantenga en el rango establecido.

5. Que la extracción de la cachaza de los clarificadores garantice que se opere con los niveles mínimos.

1.6.1- Alcalización del jugo de caña.

El tratamiento con cal se ha constituido a través de los años en el primer paso para la depuración química del jugo tamizado. Generalmente se añade en forma de lechada de cal. Puede ser añadida al jugo por un método manual (intermitente), en el cual se forman zonas de alta alcalinidad. También puede ser añadida por medio de dispositivos mecánicos automáticos o por medio de un equipo controlado electrométricamente, flexible y capaz de aumentar o disminuir la cantidad de lechada según los requerimientos del proceso. Para controlar la alcalización del jugo se mide el pH, el cual debe ser superior a 7,5, logrando una buena clarificación para valores de pH entre 8 y 9, (Cruz, 2007).

La cal ha sido la sustancia química usada universalmente para neutralizar la acidez del jugo, mientras que el proceso varía en el método y la temperatura de adición, (Wright, 2005).

Las variaciones respecto al proceso de defecación simple han buscado reducir el color y la turbiedad del jugo clarificado, entre ellos se incluyen:

Sulfitación: Esta combina el tratamiento con ácido sulfuroso (a partir del gas SO₂) y con soluciones de cal. La sulfitación puede ser realizada sobre jugo frío o caliente.

Fosfatación: Pequeñas cantidades de fosfato soluble pueden añadirse a los jugos para mejorar la defecación simple. La técnica de fosfatación se utiliza principalmente para la clarificación de jarabes en fábricas de crudo y refinerías.

Carbonatación: El tratamiento del jugo encalado con dióxido de carbono, seguido de una aplicación adicional de cal para neutralizar, se conoce como “carbonatación”. Actualmente este proceso se utiliza sólo en raras ocasiones para la clarificación de jugo, pero continúa siendo un proceso básico en la clarificación y decoloración de jarabes de refinería.

Para la alcalización, la lechada de cal debe ser preparada a 20 °Be y luego disminuirse hasta 4 °Be, valores por debajo al límite inferior significaría una incorporación de agua indeseable al proceso, por otra parte valores superiores de densidad pudieran afectar su bombeo, la formación de la suspensión con el jugo mezclado y el control del pH, (Clark, 1975).

Según (Marín, 2012) la cal se puede adicionar al jugo de varias formas, pero generalmente las industrias prefieren adicionarla en una suspensión acuosa debido a que por este método es posible conocer la densidad de la misma y permite cuantificar la cantidad de calcio necesaria a adicionar según un volumen determinado de jugo.

Según (Jenkins, 1971) y (Morrell, 1985) el jugo extraído por los molinos es ácido, esto favorece que pueda ocurrir la inversión de la sacarosa, fenómeno no deseado en el proceso, por lo que es necesario su neutralización elevando su pH con la adición de hidróxido de calcio hasta aproximadamente igual a 7 (A valores de pH bajos puede ocurrir la inversión de la sacarosa y a valores de pH elevados puede ocurrir la destrucción de los azúcares reductores, produciendo un efecto negativo en el color y la viscosidad del jugo, todos estos factores reducen la eficiencia en el proceso de purificación).

El jugo mezclado obtenido en la etapa de molienda es de carácter ácido (pH aproximado: 5.2), éste se trata con lechada de cal, la cual eleva el pH para minimizar las posibles pérdidas de sacarosa e inversiones posteriores, además de obtener un jugo brillante y un adecuado volumen de cachaza. La acción de la cal sobre el jugo es importante porque los ácidos orgánicos se eliminan y las materias albuminoides, se coagulan, una parte de los materiales pépticos y colorantes se destruyen o se insolubilizan. Esta purificación es sobre todo física, se forma un precipitado de materiales coagulados, que arrastra las impurezas físicas al envolverlos, (Morales, 2012).

A opinión del autor, el jugo mezclado que entra a la etapa de purificación presenta un carácter ácido por lo que es necesario llevar a cabo un proceso de alcalización, con el objetivo de obtener un pH neutro en el jugo clarificado para minimizar las pérdidas por inversión de sacarosa y lograr la formación de fosfato de calcio necesario para la obtención de flóculos, indispensables para una buena sedimentación en el clarificador.

Honing citado por (Días, 1999) aclara que las modificaciones que se han realizado al proceso de alcalización simple como método de clarificación de jugo, involucran la cal y la secuencia del calor:

1. Alcalización en frío. También conocido como método cal-calor es el método que se utiliza originalmente. Se adiciona cal al jugo (usualmente entre 2,5 – 7,5 % de calcio) hasta obtener un pH de 7,2 – 8,6. Posteriormente se calienta a 100 – 102 °C, y se deja asentar.

Normalmente se desea un jugo alcalizado aproximadamente neutro. Este método se dejó de utilizar cuando los jugos de la caña comenzaron a ser más difíciles de tratar.

2. Alcalización en caliente También conocido como método calor-cal muestra mejores resultados en la clarificación del jugo que la alcalización en frío, debido a que se forman flóculos de mayor tamaño y peso. El método consiste en calentar el jugo a 100 – 102 °C, añadir lechada de cal hasta un pH de 7,6 – 8,0 y posteriormente dejar asentar.

3. Alcalización fraccionada. También conocido como método cal – calor – cal consiste en añadir cal hasta un pH de 5,8 – 6,4. Se calienta el jugo a 100 – 102 °C y nuevamente se adiciona cal hasta un pH de 7,4 – 7,8, lo cual produce una clarificación satisfactoria en los jugos de caña que no maduraron completamente.

4. Alcalización con doble calentamiento. También conocido como método calor – cal – calor consiste en calentar y que la temperatura no sobrepase los 60°C, se adiciona cal y se eleva la temperatura hasta unos 100°C aproximadamente. Se dice que este método elimina mejor los no azúcares y produce lodos más compactos.

5. Alcalización fraccionada y doble calentamiento. También conocido como método cal – calor – cal – calor consiste en alcalizar el jugo hasta un pH de 6,0 – 6,4, se calienta hasta 93°C, se alcaliza nuevamente hasta un pH de 7,6 – 7,8, se calienta a 100 – 102°C y se deja asentar. Con este método se alcanzan sedimentaciones más rápidas, elevación de la pureza, disminución en el consumo de cal, lodos más compactados, eliminación de coloides, entre otros. Aunque con la acción conjunta de la cal y el calor se forma un precipitado denso de composición compleja, que arrastra consigo la mayor parte del material en suspensión del jugo y promueve la clarificación, si se desea incrementar de manera relevante la eficiencia y la velocidad de la clarificación de jugo, se requiere de un proceso alterno denominado floculación que involucra la aplicación de polielectrolitos como agentes floculantes. Esta fue la innovación más reciente que tuvo el proceso de defecación. A criterio de la autora la alcalización es una de las subetapas más importantes dentro de la etapa de purificación, ya que en ella es donde comienza el proceso de coagulación de las impurezas mediante la reacción entre el óxido de calcio y los fosfatos presentes en el jugo. De todos los métodos que involucran la cal y el calor el que considero más eficiente es la alcalización fraccionada y doble calentamiento porque se obtiene un jugo mucho más brillante, la cachaza filtra mejor, produce cachaza seca y porosa y elimina un 90% de ceras.

1.6.2- Calentamiento del jugo de caña.

Según (Caballero, 2013) esta operación tiene por objetivo calentar el jugo desde la temperatura a la que sale del tanque de alcalización hasta la temperatura de ebullición normal a la presión atmosférica del lugar. El calentamiento tiene por función fundamental acelerar la velocidad de la reacción de los fosfatos tricálcicos. El calentamiento de los jugos puede efectuarse antes, después o durante la alcalización del jugo; se realiza como complemento de la misma, facilitando la precipitación de las impurezas presentes para obtener jugos más puros. Esta operación se realiza con la ayuda de calentadores de tubos, y si el rango de calentamiento es muy grande, el calentador requiere un mayor número de pasos. Para aumentar la temperatura del jugo, se utiliza vapor proveniente de las calderas o de la etapa de evaporación, (Cruz, 2012). Es importante que la temperatura del jugo a la salida de los calentadores alcance valores entre 102–105°C con el fin de asegurar la coagulación de las proteínas. Las variaciones en la temperatura del jugo producirán gradientes de temperatura en el clarificador, los cuales causan que los lodos, en lugar de sedimentarse, presenten tendencia a subir, (Steindl, 2008).

(Pedrosa, 1983), señala que es buena práctica elevar la temperatura del jugo en unos 4°C porque de esa forma al producirse el flasheo y quedar el jugo a la presión atmosférica, ayuda a eliminar todo el aire que pudiera traer incluido, debido a bombeos, mezcla de cal, etc. (Honig, 1974), agrega que los cambios en la temperatura afectan profundamente la viscosidad de las soluciones de azúcar, la que disminuye rápidamente con el aumento de la temperatura. Este es uno de los principales factores que influye sobre la velocidad de hidrólisis de la sacarosa, así como en la descomposición de los azúcares reductores. Con el calentamiento se descomponen una serie de sustancias coloidales, lo que ocasiona que se aglomeren y disminuyan su solubilidad en el jugo; ocurre la destrucción enzimática y microbiológica de las impurezas del jugo; algunos constituyentes orgánicos se coagulan, lo que facilita la remoción de las impurezas durante el proceso de sedimentación; acelera la formación de partículas de mayor tamaño y densidad debido a que incrementa la velocidad del movimiento, ocasionando que el número de oportunidades con la que las partículas pueden colisionar aumente; y provoca que el jugo disminuya de densidad y viscosidad, (Rocasolano, 1917).

1.6.3- *Proceso de clarificación.*

La clarificación es una operación de sedimentación cuyo interés principal es lograr un jugo claro para ser enviado al proceso. Puede considerarse como una etapa fundamental en el proceso de purificación. Esta es una operación unitaria que consiste en separar una suspensión en sus componentes. Las partículas sólidas descienden y se acumulan en el fondo, obteniéndose por la parte superior el jugo claro. (Rodríguez, 1986).

Del tanque flash el jugo pasa al clarificador, donde se completa la reacción química que había comenzado con la alcalización y se produce la separación de los sólidos coagulados por sedimentación, de forma que se obtenga un jugo claro, brillante y transparente. En este se resumen todas las operaciones de calentamiento y alcalización, con la separación en dos corrientes: la de los lodos que son reprocessados y tratados en la estación de filtros y la de jugo clarificado que se envía hacia la estación evaporadora para su concentración. (Spencer, 1969).

Dentro de los objetivos de la clarificación tenemos los siguientes:

- a) Obtener un volumen mínimo de cachaza, lo más concentrado posible.
- b) Obtener un jugo claro en suspensión, pH neutro y sin caída de pureza.
- c) Obtener la máxima precipitación, coagulación, velocidad de sedimentación, eliminación de los coloides y no azúcares.
- d) Concluir la operación de forma que las pérdidas de sacarosa y los costos de producción sean mínimos.

En el clarificador ocurren transformaciones físicas y químicas:

Físicas: ya que ocurre una separación de los sólidos coagulados (lodos) del jugo alcalizado, obteniendo esos jugos clarificados

Químicas: porque se consolida la reacción del ácido fosfórico del jugo con el óxido de calcio para formar el flóculo de Fosfato Tricálcico que a través de la coagulación-floculación precipita hacia el fondo.

Para la clarificación de jugo las industrias azucareras utilizan floculantes sintéticos aniónicos o catiónicos sólidos, por lo general se inclinan más por el uso de floculantes aniónicos debido a que ellos poseen una gran afinidad con las superficies sólidas, El uso de este tipo de floculantes comenzó a finales de la década de 1950. Desde entonces, los estudios están encaminados a la resolución de problemas tecnológicos relacionados con la

aceleración y aumento de eficacia del polímero en procesos de separación de sistemas sólido-líquido. Hasta el momento, investigaciones realizadas han comprobado que no existe un polímero que se desempeñe igual en todas las industrias azucareras. Esto indica que cada fábrica deberá hacer la selección del producto que aplicarán a su proceso, según sean sus condiciones de operación. El uso de floculantes o polímeros ha tenido grandes aplicaciones industriales diferentes a la fabricación del azúcar, tales como:

1. En el tratamiento de aguas potables e industriales de proceso.
2. Depuración de aguas residuales, específicamente en tratamientos físico – químicos.
3. Tratamiento de fangos, para mejorar el rendimiento de centrífugas y filtros prensa.
4. Procesos industriales en papeleras, petroquímica, tratamiento de minerales, conserveras, etc.

1.6.3.1- Principales problemas operacionales que se pueden presentar en el área de clarificación.

- Presencia de bagacillo en el jugo clarificado, que se detecta por simple inspección del jugo clarificado.
- Disminución de la temperatura de salida del jugo alcalizado a la entrada del tanque flash.
- Dificultades en la operación de los filtros de cachaza, que condicionan el retorno de bagacillo en exceso al clarificador.
- Revoltura del jugo clarificado, que se aprecia por la presencia de cachaza y abundante bagacillo en el jugo.
- Desajustes e irregularidades en el PH del jugo alcalizado.
- Viscosidad anormalmente elevada en los jugos, por problemas de calidad de la caña.
- Cachaza de muy baja concentración (cachaza floja), que se conoce por simple apreciación a la salida de las bombas de cachaza.
- Alto brix del jugo mezclado, que se aprecia por simple inspección de los resultados del laboratorio o por reducción anómala de la velocidad de sedimentación.
- Déficit de fosfórico en el jugo, produce un jugo descompensado químicamente muy difícil de tratar.

1.6.3.2- Influencia del bagacillo en el jugo clarificado.

La presencia de bagacillo en el jugo claro se debe generalmente tres situaciones:

1. Operación inadecuada con poco control del flujo de líquido claro que sale, mediante las válvulas manuales.
2. Cambios de temperatura dentro del equipo.
3. Poca área de sedimentación disponible para el flujo de jugo que se está procesando; lo que puede evitarse no moliendo a tasas de molienda horaria mayores a la adecuada.

A opinión del autor, el proceso de purificación del jugo es complejo ya que depende en grado sumo de la eficiencia y calidad con que se hayan realizado las operaciones anteriores, es primordial para una buena operación de purificación trabajar con jugos de calidad, lo que significa procesar jugos de caña frescos, con un contenido de fósforo que permita su clarificación, con bajo contenido de azúcares y poca cantidad de sólidos en suspensión.

Otras causas de la excesiva presencia de bagacillo en el jugo clarificado son:

- ✓ Excesivo grado de preparación u obedece a un problema puntual de la calidad de la fibra del lote de caña que se está moliendo.
- ✓ Disminución de la temperatura de salida del jugo alcalizado a la entrada del tanque flash.
- ✓ Dificultades en la operación de los filtros de cachaza.
- ✓ Revoltura del jugo clarificado.
- ✓ Desajustes e irregularidades en el PH del jugo alcalizado.
- ✓ Viscosidad anormalmente elevada en los jugos.
- ✓ Cachaza de muy baja concentración (cachaza floja).
- ✓ Alto brix del jugo mezclado.
- ✓ Déficit de fosfórico en el jugo.

1.6.3.3- Equipos sedimentadores. Sus características operacionales.

El jugo, que sale del Tanque Flash, contiene la mayor parte de las sustancias no azúcares que se desean eliminar. Sobre los flóculos, que se han formado en el proceso de clarificación básicamente por las reacciones entre los iones fosfato y de calcio, se aglomeran partículas finas suspendidas que incrementan su tamaño y densidad. En el Clarificador (Ver figura 1.3) los flóculos sedimentan por gravedad saliendo por el fondo en forma de lodo, que se denomina “Cachaza”. Es conveniente apuntar que también se le denomina

“Cachaza” a la torta que sale del Filtro Rotatorio al Vacío, al que nos referiremos posteriormente. Por la parte superior del Clarificador sale el jugo “claro o clarificado”; cuyo flujo, al igual que la del lodo que sale por debajo, se puede controlar mediante válvulas manuales que operan en base al principio de vasos comunicantes. Lo anterior quiere decir que el Operador del equipo puede ejercer un control para evitar o disminuir a un mínimo la salida de insolubles en el jugo claro.

En cualquier texto de Operaciones Unitarias de Ingeniería Química [FOU62], [PRI99] que trate la Sedimentación se explica que, si esta es libre, la velocidad de sedimentación de las partículas (flóculos) se favorece con una mayor diferencia entre la densidad de las partículas y la del líquido, pues mientras más densos sean los flóculos mayor será su velocidad terminal. Esta última disminuye con los aumentos de la viscosidad del líquido, por lo que el jugo en el Clarificador debe tener una temperatura entre 98 y 99 °C. Mientras menos temperatura tenga el jugo hay una mayor tendencia a que salgan insolubles, por ejemplo bagacillo, en el jugo claro. Estos insolubles afectan la calidad del azúcar comercial que se produce.

La mayor parte de los Clarificadores (Sedimentadores) en Cuba y otros países tienen varias bandejas (Figura 1.3A) que entre si tienen algunas diferencias de diseño pero que no son determinantes. Lo que sí es determinante es que su diseño conceptual es erróneo; Es por esto que, en los Clarificadores de varias bandejas, el mismo floculo sedimenta innecesariamente varias veces en las diferentes bandejas, entre otras causas la de que estas no tienen una altura adecuada que permita que todos los flóculos sedimenten en una sola [FOU62], [PRI99]. En los equipos de múltiples bandejas el tiempo de residencia es como mínimo 1,5 horas pero son comunes valores de 2 y 3 horas. Notas sobre la producción de azúcar crudo.(autores, 2005).

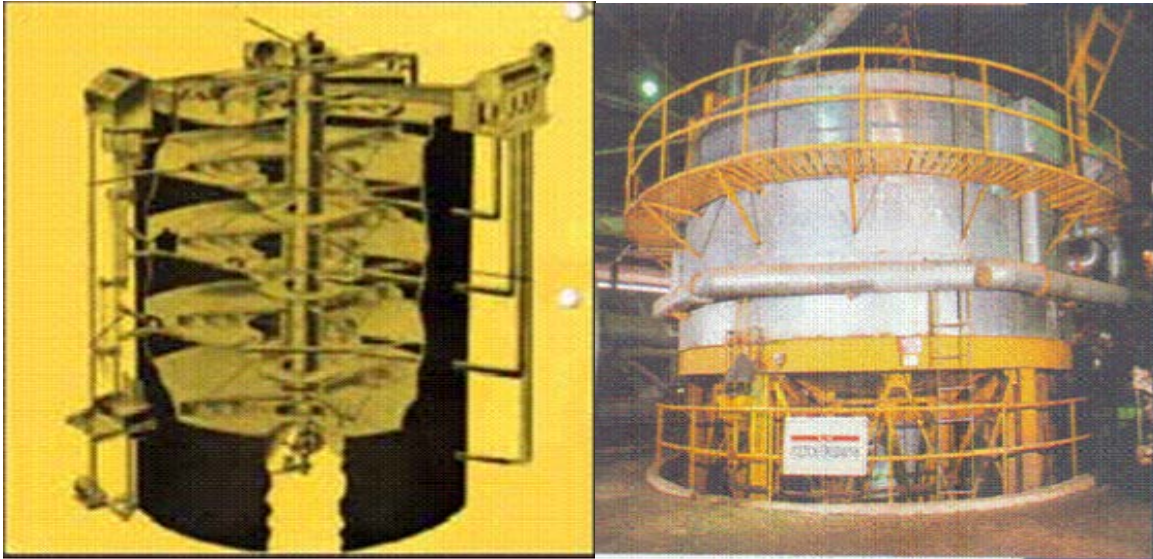


Fig. 1.3: A. Clarificador de 4 Bandejas [DOR96] B. Clarificador SRI Una Bandeja [STE05]

En 1969 se instaló en el primer equipo de una sola bandeja (“sin bandejas”) del tipo SRI, como el de la Figura 1.3 B. Tienen tiempos de residencia de aproximadamente 40 minutos; lo que significa menores pérdidas de sacarosa pero sobretodo una disminución de hasta un 10 % del “color” del jugo claro [STE05]. Debido a su menor volumen por tonelada de caña molida se evitan gastos y pérdidas de tiempo en las operaciones de arrancada y se disminuyen las pérdidas de azúcares durante el vaciado del equipo en las paradas. Otra ventaja es que los costos de inversión, instalación y mantenimiento son menores. (Ver figura anexo 5)

Fuente: Manual de operaciones para la fabricación de azúcar crudo.(2005).

Las limitantes que se le atribuyen a estos equipos [MON98] son:

- a) un aumento de los costos de operación pues se adicionan “floculantes” al jugo; lo que se realiza con el propósito de aumentar la densidad de los flóculos y por ende alcanzar mayores velocidades de sedimentación.
- b) que el “fango” (cachaza) que sale por el fondo es poco denso. La primera supuesta limitante no es válida ya que la relación entre los costos del empleo de floculante versus los beneficios de añadir floculante es favorable al uso de equipos de una sola bandeja. La segunda, que en un primer momento fue válida pero no invalidante, ha sido superada ampliamente pues en los actuales modelos australianos SRI se logran cachazas “pesadas” con densidades entre 1075 y 1105 kg/m³ [STE05].

A mediados de los años 90 se empezó a usar exitosamente el Sedimentador cubano de una sola bandeja denominado “BTR” [PER98]; que por supuesto usa floculantes.

En el Central Azucarero Abel Santamaría está instalado un Clarificador de Bajo Tiempo de Retención (BTR), de una sola bandeja, el cual se ha vuelto casi un estándar para todas las instalaciones nuevas.

En dicho clarificador de bajo tiempo de retención se separa fango del jugo claro en el proceso de la clarificación. Debido a su diseño, el mismo, permite tiempos de retención reducidos y pérdidas reducidas del azúcar que lo hacen ideal substituir los clarificadores multibandejas, la turbiedad del jugo es baja, y se reduce su coloración de la salida. El consumo de floculante es bajo y el fango es de alta densidad. El diseño es robusto, la instalación es simple. Se reducen los requisitos de mantenimiento, y se automatizan el retiro del fango y la dosificación de floculante. Se optimiza la seguridad.

Los tiempos de residencia menores condicionan también un menor desarrollo de reacciones indeseables, incluyendo las relacionadas con aspectos microbiológicos en los lodos del clarificador que incrementan su importancia por la recirculación del jugo de filtro.

Los clarificadores de Bajo Tiempo de Retención son superiores a los clarificadores convencionales porque manejan continuamente mayores flujos de jugo en un menor tiempo, esto implica menor posibilidad de inversión de la sacarosa, menor destrucción de las sustancias que producen color y menores pérdidas de calor. Además de proporcionar un mayor desendulzado de los lodos y lograr una mayor compactación de los mismos.

1.7- Proceso de filtración del lodo.

La cachaza obtenida en los clarificadores contiene jugo que es necesario recuperar mediante la filtración. Esta es una operación unitaria de suma importancia ya que permite la separación sólido líquido de un modo sencillo. El lodo o cachaza que sale del clarificador se acondiciona con vistas de recuperar el mayor porcentaje de estos y obtener una cachaza con gran agotamiento. (Gómez, 1999).

Esta va a un tanque donde se le adiciona bagacillo como medio filtrante y posteriormente pasa a la filtración. Los equipos empleados para esta operación son filtros rotatorios al vacío, que tienen como objetivo agotar el lodo para recuperar el jugo que todavía le queda. En estos la cachaza pasa a través del medio filtrante por diferencia de presión, obteniéndose

un jugo claro, mientras que queda retenida la torta, compuesta por los precipitados, bagacillo y sales insolubles. (Hugot, 1980).

El jugo filtrado obtenido es recirculado al tanque de jugo mezclado, debido a la cantidad de sólidos insolubles que presenta, dado esto por los altos volúmenes de materias extrañas y mecanización de las cosechas.(Rodríguez, 1985).

Con la operación de filtración concluimos con la etapa de purificación y se pasa entonces a concentrar el jugo purificado.

1.8- Proceso de concentración del jugo.

En esta operación del proceso se lleva a cabo la evaporación del 73 al 75 % del agua presente en Evaporadores a simple y múltiple efecto. Lográndose con este proceso concentrar el jugo desde 15.5 hasta 65 °Brix. Se consideran equipos a simple efecto a los vapor cell y pre evaporadores; como múltiple efecto a los dobles, triples, cuádruples y quíntuples efectos, los cuales son capaces de aprovechar varias veces la misma cantidad de calor. La forma diseño y arreglos de los esquemas de evaporación, aunque dependen de la capacidad del ingenio, presiones de operación y diseño de los equipos, responden siempre al principio de obtener la mayor evaporación posible con la menor cantidad de equipos; buscando además el más bajo consumo de vapor para mantener la meladura en el rango de 60 a 65 °Brix.

De la correcta operación de la estación de evaporación dependerá el que el ingenio pueda asumir la molida horaria, pues los tachos no podrán procesar la meladura floja correspondiente a ella; también determinará la máxima recolección de los condensados para la reposición necesaria del agua de alimentar las calderas y para usos tecnológicos.

1.9- Proceso de cristalización del azúcar.

La operación conocida en el ingenio como cocción del azúcar es esencialmente el proceso de cristalización, que se efectúa en evaporadores al vacío de efecto sencillo, diseñados para la manipulación de materiales viscosos y llamados tachos de vacío. El tacho de vacío, por tanto, viene a ser un cristizador evaporativo, esto es, un cristizador en que el grado de súper saturación o sobresaturación se controla y mantiene por medio de la evaporación del disolvente, en tanto que el material disuelto cristaliza.(Honing, 1959).

En la práctica, es conveniente para que los cristales se formen en el licor madre, que exista una sobresaturación considerable, la cual disminuye en la proporción en que los cristales se forman y crecen en el licor madre.

En dicha operación se distinguen tres zonas en la fase sobresaturada:

1. La zona meta estable: Próxima a la saturación; los cristales existentes crecen, pero no se pueden formar nuevos.
2. Zona intermedia: En esta pueden formarse nuevos cristales, pero solo en presencia de los existentes.
3. Zona lábil: En esta los cristales existentes crecen y pueden formarse nuevos aun en ausencia de cristales.(Hugot, 1980).

En las soluciones de sacarosa, a diferencia de algunos otros solutos, la amplitud de las diferentes zonas es suficiente para permitir el uso de las distintas zonas en el proceso de cristalización. Así, con un control apropiado, suele formarse el número necesario de núcleos de cristal y, con el mantenimiento de la solución en la zona meta estable por el resto de la carga, tales cristales pueden hacerse engordar sin formación de cristales adicionales. Por este medio se puede aplicar un buen control en lo que respecta al tamaño y la uniformidad de los cristales.(Jenkins, 1971).

La velocidad de cristalización en las masas cocidas depende de:

- a) La viscosidad.
- b) Temperatura (influye en la viscosidad).
- c) La sobresaturación.
- d) La pureza.

El proceso de cocción del azúcar se puede considerar solamente en términos del trabajo total de los tachos y las centrífugas.(Jenkins, 1971).

Los tachos pueden ser de dos tipos: de calandria, de serpentines o de ambos (siendo en nuestro caso del primero). Estos constan de un vaso cilíndrico vertical de hierro fundido con fondo cónico para facilitar la salida de la masa cocida o templa estando cerrada en su parte inferior por una válvula denominada de descarga. La masa cocida no es más que una masa concentrada o magma de cristales de azúcar y miel que se produce en el tacho. En estos se concentra la meladura por evaporación hasta un nivel de sobresaturación que

permita la obtención del grano de azúcar de diferentes formas, siguiendo la cocción de distintas templeas hasta llegar a un tamaño conveniente.

Cuando el jugo se concentra, su viscosidad aumenta rápidamente con el brix y, al llegar a los 77-80 °Brix comienzan a aparecer cristales modificándose la naturaleza del material al pasar progresivamente del estado líquido a una condición en parte sólida y en parte líquida, el material pierde su fluidez progresivamente, de manera que es necesario emplear métodos diferentes para manejarlo, en éstas condiciones el material recibe el nombre de “masa cocida”. La cristalización se realiza en el cristizador por la disminución de solubilidad de la sacarosa a temperaturas más bajas. De este modo se logra la cristalización por enfriamiento, a diferencia de la concentración por evaporación bajo condiciones sustancialmente isotérmicas en el tacho de vacío. El interés se concentró al principio en facilitar tiempo para la continuación de la cristalización. Sin embargo, es la reducción de la temperatura, más bien que el tiempo, lo importante. Prueba de ello es que los cristizadores con enfriamiento de agua se han generalizado en los últimos años, con vista a lograr la reducción de la temperatura necesaria, en tiempo más corto que el que es posible por el simple enfriamiento con aire natural.(Jenkins, 1971).

La sacarosa se cristaliza de la meladura en tres etapas:

La masa cocida primera o A consiste esencialmente en desarrollar los cristales de un pie de semilla con meladura procedente de los efectos. Esta meladura se concentra, en definitiva, al máximo contenido de cristal que se puede lograr, para formar la masa cocida primera o A. Esta templa se descarga en un mezclador, para pasar después a las centrífugas, donde el licor madre se separa, en tanto que el azúcar sale como azúcar crudo acabado que se designa como azúcar A, el licor madre separado viene a constituir la miel primera o A. Esta forma la base de la masa cocida de segunda o B a partir de un pie de semilla, la cual pasa, en su oportunidad, a las centrífugas, para producir, a su vez, una nueva porción de azúcar crudo acabado y la miel segunda o B, que forma la base para la masa cocida tercera o C. Esta es la masa cocida final o de agotamiento, y al descargarse del tacho, pasa a un cristizador para completar la cristalización hasta donde sea posible, por enfriamiento.(Jenkins, 1971).

Existen diferentes sistemas de masas cocidas siendo los más frecuentemente utilizados en Cuba, el sistema clásico de tres masas cocidas y el de doble semilla.

Por último se pasa al área de centrifugación, aquí es fundamental controlar el agua de lavado, esta operación tiene como objetivo separar debido a la fuerza centrífuga los cristales de la miel. El azúcar comercial la forma el azúcar de primera, obtenida de la masa cocida A y el azúcar de segunda es obtenida de la masa cocida B, ambas se unen y mediante elevadores y conductores se traslada hasta el almacén. Las mieles obtenidas se bombean hacia los tachos para ser utilizados en el proceso. La miel final se almacena en tanques. En esta área se debe controlar el tiempo de centrifugación y la cantidad de agua necesaria para cada templa (el tiempo de centrifugación y la cantidad de agua deben controlarse de acuerdo a la calidad de la masa), pues cuando el agua es excesiva se produce un lavado innecesario del azúcar con la consiguiente pérdida del rendimiento de la misma y se produce además un incremento en la pureza de la miel, cuando la cantidad de agua no es suficiente no ocurre un lavado adecuado lo que provoca el aumento del color y la disminución de su pol.

Esta azúcar obtenida en las centrífugas es sometida a un proceso de secado y es enviada al piso de azúcar, donde puede ser envasada para su almacenamiento o simplemente guardada a granel en la torva de azúcar.

1.10- Conclusiones parciales.

1. En Cuba la agroindustria azucarera es considerada la actividad económica más importante, ya que proporciona la mayor fuente de ingresos en divisas al país, facilitando su desarrollo, además brinda un gran número de empleos a sus habitantes.
2. La calidad de la materia prima, así como un estricto control del funcionamiento de los equipos del proceso son factores fundamentales para que se obtenga la eficiencia y calidad requerida del producto.
3. La etapa de purificación ocupa un lugar muy importante dentro del proceso de obtención de la sacarosa. Su función principal es eliminar las impurezas y otros no azúcares presentes en el guarapo.

Capítulo 2. Etapa de purificación: Vías para su intensificación y cálculos ingenieriles.

En el presente capítulo se abordan las vías para intensificar la purificación, así como cálculos ingenieriles que se utilizaron para lograr el cumplimiento del objetivo propuesto en esta investigación.

2.1- Descripción de la etapa de purificación de los jugos de caña en el Central Azucarero Abel Santamaría.

El proceso productivo de azúcar crudo, comienza cuando la caña se traslada a los centros de limpieza de la industria con el objetivo de reducirle el contenido de materia extraña (tierra, raíces, hojas, pajas, etc.), luego se envía al ingenio por diferentes medios de transporte con distintas capacidades.

Cuando se recibe, primeramente, se muestrea mediante análisis de laboratorio para determinar las características de calidad y el nivel de impurezas, luego se pesa y se conduce hacia la descarga en el área del basculador, descargándose en la estera alimentadora, la cual permite a los niveladores mantener un colchón con la altura prefijada entrando a las cuchillas. Los vacíos en la estera provocan una caída considerable en el índice de preparación ya que al entrar a las cuchillas un colchón bajo, estas no pueden preparar correctamente la caña. En la actualidad se está generalizando la alimentación automática del tándem, lo cual consiste en regular la velocidad de la estera en función de mantener constante la cantidad de caña que entra a la primera unidad de molida, obteniéndose muy buenos resultados para la eficiencia del tándem y de la fábrica en su conjunto.

La caña preparada llega a la planta moledora que cuenta con un tándem de cinco molinos, constituido cada uno de ellos por tres masas: la cañera, la bagacera y la superior. En esta área es donde se realiza la extracción del guarapo a la caña mediante presión, por lo que su trabajo es el punto de partida del balance de masa y energía de la fábrica.

Durante la estancia de la caña por el área se le añade agua de imbibición con una temperatura que oscila entre de 60 y 80°C, para extraer al máximo la sacarosa que contiene el material fibroso. El central cuenta con un sistema de imbibición compuesta el cual consiste en adicionar toda el agua a la entrada del último molino, el jugo de este se recircula y descarga en el colchón que entra al penúltimo molino, de este al anterior y así sucesivamente en todos los molinos a los que se aplique jugo, llegando hasta la salida de la primera unidad.

El bagazo sale de la última unidad de molienda con una humedad aproximada entre un 48 y 50%, y luego se conduce a una bagacera para que seque. La porción más fina de esta corriente (bagacillo) se separa para mezclarla con los lodos que salen del clarificador y la otra parte se utiliza como combustible en las calderas para producir el vapor de alta presión que se emplea en las turbinas de vapor.

El jugo mezclado se tamiza en un colador para reducirle el contenido de bagacillo cuya eficiencia en su remoción permita que el jugo crudo tenga como máximo 5 g/L de bagacillo en suspensión; este es bombeado al área de purificación que tiene como objetivo purificar y alcanzar la mayor separación posible de las impurezas presentes en el jugo logrando que en su mayoría salgan en forma de cachaza, obteniéndose un jugo claro con calidad. Primeramente, el jugo que posee un carácter ligeramente ácido con valores de pH alrededor de 5.2, se trata en un proceso de alcalización en frío con lechada de cal diluida en una proporción que va desde 500 y hasta 650 gramos de óxido de calcio por tonelada de caña molida, la cual eleva el pH con el objetivo de minimizar las posibles pérdidas por inversión de la sacarosa, también ayuda a precipitar impurezas orgánicas e inorgánicas que vienen en el jugo.

Después pasa a la etapa de calentamiento con el objetivo suministrar el calor suficiente al jugo mezclado como para elevar su temperatura desde 40 hasta 103°C y completar así la reacción entre la lechada de cal y los fosfatos presentes en el jugo; para ello cuenta con un sistema de tres intercambiadores de calor en serie, uno primario que opera con vapor de extracción del primer vaso del cuádruple y dos rectificadores que trabajan con vapor de escape.

Luego de este procedimiento el jugo pasa al tanque flash que opera a presión atmosférica, donde se liberan vapores y gases incondensables; el jugo sale a su temperatura de

ebullición. A la salida del tanque se le adiciona el floculante, para posteriormente ingresar a la clarificación del jugo; a la entrada del equipo se regula el flujo mediante una válvula automática para evitar revolturas causadas por flujo turbulento.

En el clarificador se resumen todas las operaciones de calentamiento y alcalización, con la separación en dos corrientes; la de los sólidos no azúcares precipitan en forma de lodo que serán reprocessados y tratados en la estación de filtros al vacío por su contenido de sacarosa y la de jugo clarificado que se envía hacia la estación evaporadora para su concentración.

Los lodos del clarificador son llevados a un mezclador (cachazón) donde se le adiciona bagacillo como medio filtrante, en proporción suficiente como para formar una torta con buenas propiedades físico-mecánicas. En el filtro se le adiciona agua condensada contaminada caliente, alrededor de los 75°C, para agotar lo más posible la torta de cachaza. En esta estación se lleva a cabo el tratamiento de los lodos del clarificador con el objetivo de extraerles la mayor proporción de la sacarosa. El jugo filtrado se recircula al proceso bombeándose hacia el tanque de alcalizar y la torta de cachaza se utiliza en el mejoramiento de los suelos pobres en materia orgánica. Esta operación de filtración sí no se lleva a cabo en un ambiente de disciplina tecnológica puede dar lugar a grandes pérdidas directas por el elevado contenido de azúcar en la torta y por las que produce al reciclar al proceso grandes proporciones de no azúcares que son causantes de los elevados volúmenes de miel en el proceso.(Sotolongo, 2017).

2.2- Materiales utilizados en la purificación del jugo de caña.

Floculante

Un floculante es una sustancia química que aglutina sólidos en suspensión, provocando su precipitación. Los floculantes pueden ser de origen natural, los cuales se encuentran constituidos por derivados del almidón o extracto de plantas gomosas que en su interior poseen unidades de ácido galactourónico y los sintéticos (polímeros de carácter aniónico de gran longitud de cadena y elevada afinidad con las superficies sólidas). La composición y el tamaño de las moléculas pueden controlarse de forma cuidadosa lo cual hace aumentar el grado de eficiencia de los mismos.

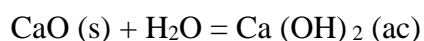
El uso de los floculantes provoca el aumento de las velocidades de sedimentación y evita revolturas. En la industria azucarera se emplean diversos tipos de floculantes para jugo, cuyo costo por ser alto determina no solamente la evaluación del problema para decidir su

empleo, sino también su correcta preparación y dosificación. La aplicación del floculante es efectiva sí se hace en forma de solución diluida en el rango de 0.05 o 0.10 % en peso, aunque se recomienda el empleo de las soluciones más diluidas, de 0.05 %, pues en esas concentraciones la acción del floculante es más efectiva. En todos los casos los cálculos se realizarán en base a la caña que se espera moler en las 24 horas siguientes, partiendo que el rango de la dosificación del floculante es de 1.5 a 5.0 ppm. Para la molienda de 1000 toneladas de caña de acuerdo con las pruebas de sedimentación, la dosificación óptima es de 2.00 ppm.

En el Central Azucarero Abel Santamaría se utiliza el floculante Quimifloc 400, el cual ha sido empleado de forma extensiva en los centrales cubanos, por su efectividad comprobada a lo largo de años y ratificado según pruebas realizadas.

Lechada de cal

El hidróxido de calcio es un polvo blanco que se obtiene por la calcinación del carbonato cálcico:



Como tiene tendencia a formar carbonato con el anhídrido carbónico (CO₂) del aire, se recomienda almacenarlo en un frasco color pardo oscuro bien cerrado.

Es poco soluble en agua, su pH es alcalino, aproximadamente de 12.4, lo que le permite ser un magnífico bactericida, hasta las esporas mueren al ponerse en contacto con el elemento. Comúnmente se prepara con suero fisiológico o agua tratada. Sus fuentes naturales se muestran a continuación:

- Cemento.
- Agua de cal.
- Muchos disolventes y limpiadores industriales (cientos de miles de productos de la construcción, raspadores de pisos, limpiadores de ladrillos, productos endurecedores del cemento y muchos otros).
- Cal apagada.

El hidrato de cal es empleado en el ingenio, en el mismo se agrega de 500 a 650 gramos por toneladas de caña molida.

En la industria azucarera se puede utilizar para precipitar impurezas y obtener sacarosa purificada. También aporta beneficios en el tratamiento de lodos ya que es una ayuda excepcional en la eliminación de microorganismos y bacterias que a su vez neutraliza los malos olores.

El uso de este no es una variante a considerar, aunque se ve favorecida la velocidad de sedimentación, la calidad del jugo disminuye debido a que el pH no alcanza los niveles de trabajo en la fábrica.

La cal hidratada para ser empleada en el proceso de clarificación debe cumplir con las especificaciones de calidad siguientes:

Tabla 2.1 Especificaciones de calidad del hidrato de cal.

Parámetros	Valores %
Oxido de calcio aprovechable mínimo	70.0
Oxido de magnesio máximo	2.5
Insolubles al ácido clorhídrico	1.5
Humedad máximo permisible	2.0
Sílice en forma de óxido máximo permisible	2.0

Fuente: Manual de Operaciones para la fabricación de azúcar crudo.(2005).

2.3- Vías para intensificar la purificación.

- Perfeccionamiento de los equipos tecnológicos.
- Perfeccionamiento de los procesos.

Perfeccionamiento de los equipos tecnológicos:

El perfeccionamiento de los equipos tecnológicos está orientado hacia la obtención de nuevos aparatos o modificación en los existentes que reduzcan el tiempo de residencia, incrementando la productividad y disminuyendo las afectaciones que sufren los materiales en proceso como son, la destrucción de azúcares reductores, aumento de color y pérdidas de sacarosa por inversión.

Ejemplos de algunos de estos equipos que han sido desarrollados y probados dentro de la tecnología azucarera, lo constituyen:

- Los calentadores de Placa, los cuales disminuyen el tiempo de residencia al aumentar el coeficiente total de transferencia de calor.

- Los clarificadores de Simple Bandeja tipo S.R.I., el que al lograr una mejor distribución de los flujos y disminuir la remezcla, aumenta su capacidad, y disminuye el tiempo de retención.
- Los clarificadores de árboles de cono, los que aumentan la superficie de sedimentación para un mismo volumen de tanque, disminuyendo el tiempo de residencia.
- Los nuevos modelos de filtros, los que logran filtrados de calidad similares a los filtros prensas, evitando la recirculación de los filtrados.

Perfeccionamiento de los procesos:

El perfeccionamiento en los procesos ha sido agrupado en:

- Perfeccionamiento en la alcalización.
- Perfeccionamiento por tratamiento superficial.
- Tratamiento con floculante.

Tratamiento con floculante:

Los floculantes son sustancias de alto peso molecular solubles en agua, que pueden ser de origen natural o sintético. Los de origen natural son derivados de almidón o de extractos de planta gomosas. En Cuba se han realizado algunas experiencias como la col marina con resultados positivos.

Los de procedencia sintética son polímeros de largas cadenas y elevada afinidad con las superficies sólidas. En el Mercado estos materiales aparecen en forma líquida, polvo y otras formas con especificaciones tanto de sus características químicas como de su forma de utilización.

Entre la amplia gama de los floculantes sintéticos pueden citarse los tipos no iónicos, aniónicos y catiónicos.

El uso de los floculantes en la Industria azucarera se inicia en los finales de la década del 50. Así Spencer-Meade, plantea que el uso de los floculantes ha sido el principal Adelanto en la clarificación en las últimas décadas.

Ya que las partículas coloidales del jugo de la caña poseen cargas negativas, es lógico pensar que los floculantes catiónicos deben ser los más efectivos. Sin embargo, debido a que en el proceso de alcalización se adiciona lechada de cal en exceso para subir el pH a la zona alcalina con previo y/o posterior calentamiento del jugo para su clarificación y tenido presente que la floculación lograda no es total, quedan impurezas con cationes cálcico

adheridas, que por su carga positiva solo pueden ser eliminadas en presencia de un floculante aniónico.

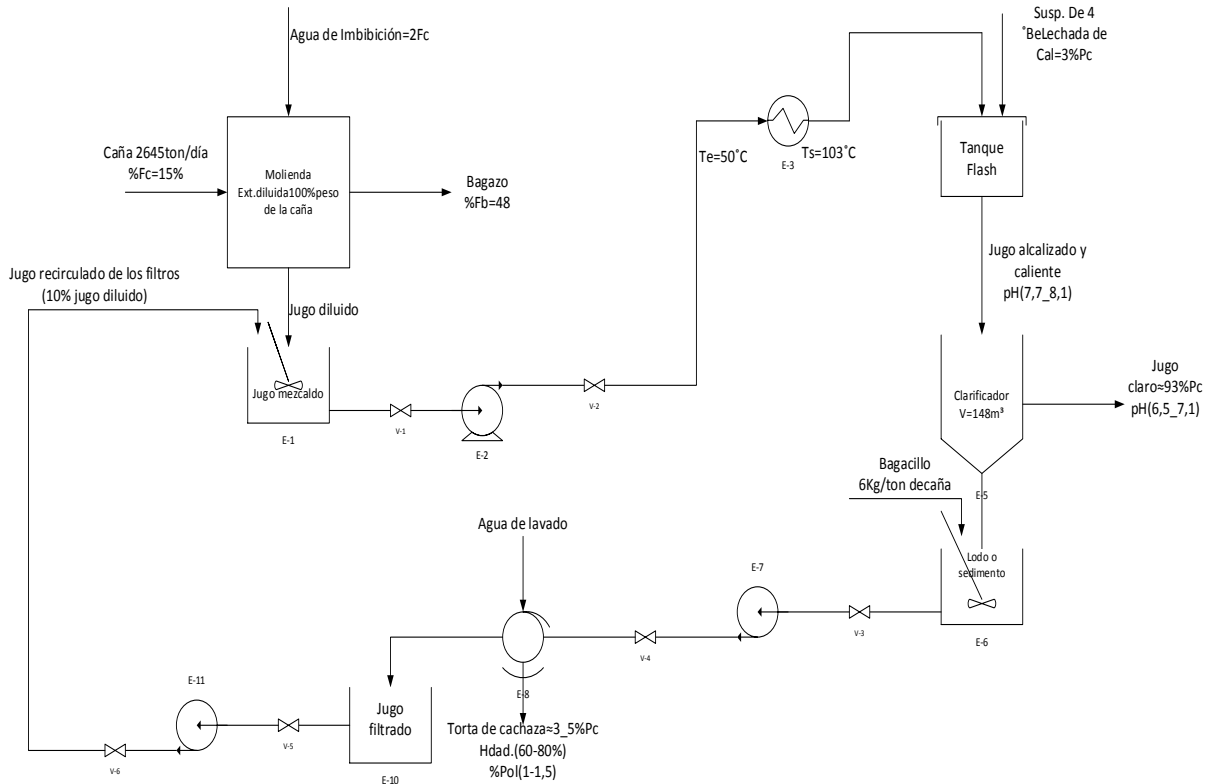
De acuerdo a estudios realizados por Morales, se recomienda:

- No todos los floculantes tiene igual actividad, por lo que deben ser evaluados para seleccionar el más adecuado.
- Con el uso del método industrial de cal y calor, la dosificación del floculante debe efectuarse después del tanque de descompresión, para evitar una pérdida de actividad de aproximadamente un 25 % de este.
- Preparar el floculante con agua de condensado y proteger el interior de los tanques de su acción corrosiva.

Tratamiento térmico de los jugos:

Con la introducción de la mecanización de la cosecha y los cambios varietales, la industria tiene que enfrentar la producción de crudos de alta calidad con una materia prima de calidad inferior, sobre todo por su elevado contenido de sustancias coloidales. Es por esto que en la purificación de los jugos se investiga en la búsqueda de nuevos métodos Físico-químicos para su elaboración, siendo una de las vías la utilización de vapor de alta presión, con la finalidad de mejorar e incrementar las propiedades clarificantes del jugo de caña.

2.4-Esquema de flujo de las etapas de molienda de la caña y purificación del jugo mezclado en la Empresa Azucarera Abel Santamaría.



2.5- Proceder para el cálculo de balances de masa.

Se realiza el balance de masa en la etapa de extracción y purificación para conocer el comportamiento de las diferentes variables de flujos que intervienen en esta parte del proceso. Se toma como base de cálculo una hora.

2.5.1- Balance de masa en el área de extracción de jugos.

En esta área se desarrolla un balance de masa con el objetivo de determinar el flujo de bagazo húmedo (BH) que sale del tándem de molinos, así como el flujo de jugo mezclado que ingresa al área de purificación.

- Ecuación general para el cálculo del jugo diluido (JD):

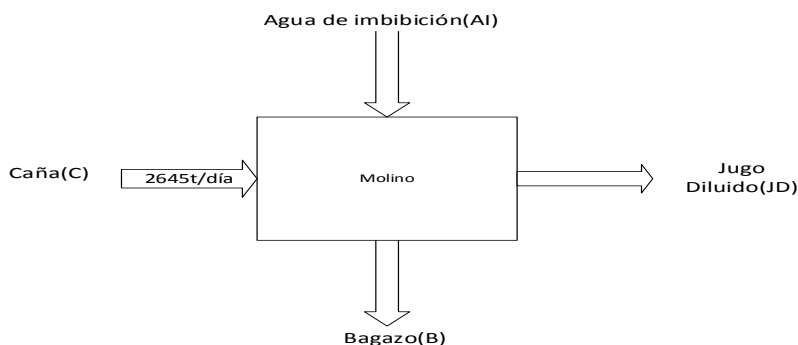


Figura 3.1 Diagrama del proceso de extracción de jugo.

Base de cálculo: 1día

$$Caña + Agua\ Imbibición = Jugo\ Diluido + Bagazo \quad Ec.2.1$$

El flujo de agua de imbibición (AI) que se suministra se determinada como se muestra a continuación:

- Cálculo del flujo de agua de imbibición (AImb.).

$$Agua\ Imb. = 2(\%Fibra\ en\ caña) \quad Ec.2.2$$

$$Agua\ Imb. = 2 * (15\% * 2645000Kg)$$

$$Agua\ Imb. = 793500Kg$$

- Cálculo del bagazo húmedo a partir del balance por componente con respecto a la fibra:

$$Caña * \frac{\%Fibra\ en\ Caña}{100} = Bagazo * \frac{\%Fibra\ en\ Bagazo}{100} \quad Ec.2.3$$

$$2645000Kg * \frac{15}{100} = Bagazo * \frac{48}{100}$$

$$Bagazo = 826563Kg$$

Mediante la ecuación 2.1 del balance de masa general de la etapa, se despeja el flujo de jugo diluido, ya que las demás corrientes son conocidas a partir de los cálculos realizados anteriormente y los datos conocidos.

$$Jugo\ Diluido = Caña + Agua\ Imb. - Bagazo \quad Ec.2.4$$

$$Jugo\ Diluido = 2611937Kg$$

- Cálculo del Jugo Mezclado que se envía a purificar:

$$Jugo\ Mezclado = Jugo\ Diluido + Jugo\ Recirculado\ de\ los\ filtros$$

$$Ec.2.5$$

$$Jugo\ Mezclado = Jugo\ Diluido + 10\%Jugo\ Diluido$$

$$Jugo\ Mezclado = 1.1(Jugo\ Diluido)$$

$$Jugo\ Mezclado = 2873131Kg$$

2.5.2-Balance de masa en el tanque Flash.

$$Jugo\ alcalizado\ y\ caliente = Jugo\ Mezclado + Lechada\ de\ cal$$

$$Ec.2.6$$

$$Jugo\ alcalizado\ y\ caliente = 2873131Kg + 3\%(Caña)$$

$$Jugo\ alcalizado\ y\ caliente = 2952481Kg$$

2.5.3-Balance de jugo que se alimenta al clarificador:

Con el objetivo de conocer la cantidad de jugo que se alimenta al clarificador se desarrolla un balance de masa, a continuación se presenta la ecuación correspondiente para la determinación de esta variable.

Masa de jugo alimentado al clarificador = Masa de jugo alcalizado y caliente + Floculante

Ec.2.7

Masa de jugo alimentado al clarificador = 2952481Kg + 13.225Kg

Masa de jugo alimentado al clarificador = 2952494.22Kg

- Masa de floculante que se añade:

Base: 5grs/ton de caña

*Masa de floculante = $\frac{5grs}{ton\ de\ caña} * 2645ton\ de\ caña$*

Ec.2.8

Masa de floculante = 13225grs = 13.225Kg

2.5.4-Balance de masa en el clarificador.

Con el objetivo de conocer la cantidad de lodo que se obtiene en el proceso se desarrolla un balance de masa, a continuación se presenta la ecuación correspondiente para la determinación de esta variable, en este caso sin floculante.

%Insolubles alimentados al clarificador: 1.05

%Insolubles en el Jugo claro: 0.052

%Insolubles en el Lodo: 2.5

Jugo alimentado al clarificador = Jugo claro + Lodo Ec.2.9

- Cálculo del Jugo claro a partir del balance por componente con respecto al porcentaje de insolubles sin floculante:

*Jugo alimentado al clarificador * $\frac{\%Insolubles\ alimentados\ al\ clarificador}{100} = Jugo\ claro * \frac{\%Insolubles\ en\ el\ Jugo\ claro}{100} + Lodo * \frac{\%Insolubles\ en\ el\ lodo}{100}$*

Ec.2.10

$2952494.22Kg * \frac{1.05}{100} = Jugo\ claro * \frac{0.052}{100} + Lodo * \frac{2.5}{100}$

Lodo = Jugo alimentado al clarificador – Jugo claro

$$2952494.22Kg * \frac{1.05}{100} = Jugo\ claro * \frac{0.052}{100} + (Jugo\ alimentado\ al\ clarificador - Jugo\ claro) * \frac{2.5}{100}$$

$$Jugo\ claro = 1748822.508Kg$$

$$Lodo = Jugo\ alimentado\ al\ clarificador - Jugo\ claro$$

$$Lodo = 1203671.712Kg$$

- Cálculo del Jugo claro a partir del balance por componente con respecto al porcentaje de insolubles con floculante:

%Insolubles alimentados al clarificador: 1.05

%Insolubles en el Jugo claro: 0.048

%Insolubles en el Lodo: 3

$$Jugo\ alimentado\ al\ clarificador * \frac{\%Insolubles\ alimentados\ al\ clarificador}{100} = Jugo\ claro * \frac{\%Insolubles\ en\ el\ Jugo\ claro}{100} + Lodo * \frac{\%Insolubles\ en\ el\ lodo}{100}$$

$$2952494.22Kg * \frac{1.05}{100} = Jugo\ claro * \frac{0.048}{100} + Lodo * \frac{3}{100}$$

$$Lodo = Jugo\ alimentado\ al\ clarificador - Jugo\ claro$$

$$2952494.22Kg * \frac{1.05}{100} = Jugo\ claro * \frac{0.048}{100} + (Jugo\ alimentado\ al\ clarificador - Jugo\ claro) * \frac{3}{100}$$

$$Jugo\ claro = 1950326.56Kg$$

$$Lodo = Jugo\ alimentado\ al\ clarificador - Jugo\ claro$$

$$Lodo = 1002167.66Kg$$

2.5.5-Cálculo de la Velocidad de Sedimentación y la densidad del sedimento.

Para el cálculo de estas variables se utilizaron los modelos experimentales (2.11; 2.12; 2.13 y 2.14), obtenidos a partir de Pruebas de sedimentación en probetas, considerando los datos de composición del jugo (P₂O₅ y Calcio) en el jugo alimentado al clarificador y la influencia del uso de floculante.

Tabla 2.2 Composición de los componentes mg/l.

Componentes	Máximo	Medio	Mínimo
Fosfato(X ₁)	475	325	210
Calcio(X ₂)	450	370	290

Floculante(X_3)	4	2	0
---------------------	---	---	---

$$V_{sed. teórica} = \frac{35452 * X_3 + 21778}{(X_2 - 29X_3 - 214)^2 + \left(\frac{X_1 - 75}{0.0312}\right)} + 1.1X_3 + 5.7 \quad \text{Ec.2.11}$$

$$V_{sed. corregida} = 0.5V_{sed. teórica} \quad \text{Ec.2.12}$$

Tabla 2.3 Resultados de pruebas experimentales de Sedimentación en probetas a escala de laboratorio.

Corridas	Fosfato	Calcio	Floculante	Vsed _{teórica} (cm/min)	Vsed _{corregida} (cm/min)
1	475	450	4	15.78	7.89
2	475	450	0	6.01	3.01
3	475	370	4	20.31	10.15
4	475	370	0	6.26	3.13
5	475	290	4	20.31	10.15
6	475	290	0	6.78	3.39
7	325	450	4	16.91	8.46
8	325	450	0	6.03	3.02
9	325	370	4	24.69	12.34
10	325	370	0	6.34	3.17
11	325	290	4	24.69	12.34
12	325	290	0	7.11	3.56
13	210	450	4	18.15	9.07
14	210	450	0	6.05	3.03
15	210	370	4	31.83	15.91
16	210	370	0	6.42	3.21
17	210	290	4	31.83	15.91
18	210	290	0	7.56	3.78

- Densidad del sedimento en función a las concentraciones de Fosfato y las temperaturas a la entrada y dentro del clarificador.

$$\rho_{sed. teórica} = \frac{X_1}{0.000925 + 9.191 * 10^{-4} * X_1} + 14 + 0.77(95 - t) \quad \text{Ec.2.13}$$

Donde:

t (Temperatura de entrada y dentro del clarificador del Jugo claro).

$$\rho_{sed. corregida} = \alpha * \rho_{sed. teórica} \quad \text{Ec.2.14}$$

α (1,009) Coeficiente de corrección para Clarificador de simple bandeja. (Rodríguez, 1982).

Tabla 2.4 Resultados de la Densidad de sedimentación a escala de laboratorio.

Temperatura	Densidad de sed. Teórica(Kg/m ³)	Densidad de sed. Corregida(Kg/m ³)
100	1095.87	1105.73
98	1097.41	1107.29
96	1098.95	1108.84
100	1094.81	1104.67
98	1096.35	1106.22
96	1097.89	1107.77
100	1092.98	1102.82
98	1094.52	1104.37
96	1096.06	1105.93

Nota: El dato de Temperatura utilizado en el modelo para el cálculo de la densidad de sedimentación, corresponde al valor promedio de la Temperatura del jugo a la entrada y salida del clarificador.

2.5.6-Cálculo del Tiempo de residencia del jugo en el sedimentador (\mathcal{T}).

$$\mathcal{T} = Y * \frac{V}{F * \text{Vel. de sedimentación}} \quad \text{Ec.2.15}$$

Donde:

V Volumen del clarificador (m³)

\mathcal{T} Tiempo de residencia (min)

Velocidad de sedimentación (m/min)

F (Área de sedimentación real instalada m²)

Tabla 2.5 Coeficiente de corrección que toma en consideración el tipo de clarificador (Y). (Rodríguez, 1982)

Tipo de equipo	Y	Tipo de equipo	Y
Dorr primer modelo	15.52	Graver	13.53

Dorr multicámaras	11.81	Fortier	11.85
Rapidor	5.74	DTC	5.86
Ibañez	11.85	Clarificador de un solo compartimiento	0.75
Pearson	12.73	UC	8.80

$$Ased. teórica = \frac{Qm_{alim.al\ clarificador} \left(1 - \frac{Xins.alim.al\ clarificador}{Xins.lodo}\right)}{\rho_{jugo\ claro} * Vel.de\ sed.corregida} \quad Ec.2.16$$

$$Ased. real = Ased. teórica + (20 - 30\%)Ased. teórica \quad Ec.2.17$$

$$\rho_{jugo\ claro} = 1002.21 + 3.7Bx - 0.0038t^2 \quad Ec.2.18$$

$$\rho_{jugo\ claro} = 1057.47Kg/m^3$$

t (Temperatura promedio a la salida del clarificador)

Grados Brix: 15

Donde:

Qmj alim. Al clarificador (Flujo másico de jugo alimentado al clarificador Kg/s)

Para la estimación de la velocidad de sedimentación de las partículas en el clarificador se tomó en consideración los valores de sedimentación promedio entre los valores máximos y mínimos de esta variable para cada condición.

Cuando no se aplica floculante el promedio de velocidad (11.9 cm/min), entre los dos mayores valores estimados, corresponde a los niveles de concentración de fosfato y calcio de 210 con 290 y de 475 con 450.

Cuando se aplica floculante el promedio de velocidad (3,395 cm/min), entre los dos mayores valores estimados, corresponde a los niveles de concentración de fosfato y calcio de 210 con 290 y de 475 con 450.

Con floculante

Xins. (%Insolubles alimentados al clarificador: 1.05)

Xins. (%Insolubles en el Lodo: 2.5)

$$Ased. teórica = 11.05m^2$$

$$Ased. real = 13.27m^2$$

Sin floculante

%Insolubles alimentados al clarificador: 1.05

% Insolubles en el Lodo: 3

$$A_{sed. teórica} = 36.85m^2$$

$$A_{sed. real} = 44.22m^2$$

Área real instalada del clarificador BTR (m²)

$$A = \frac{\pi * D^2}{4} \tag{Ec.2.19}$$

$$A = \frac{3.1416 * (4.2)^2}{4}$$

$$A = 13.85 m^2$$

Donde:

D=4.2m, (diámetro del clarificador según dimensión real del equipo instalado)

-Se pudo observar que el área real instalada del clarificador de simple bandeja satisface la requerida por el proceso para las condiciones de operación cuando se aplica floculante, no siendo así para la alternativa cuando no se aplica floculante.

2.6-Metodología para la determinación de las pérdidas de sacarosa por inversión (%sacarosa invertida/hora) y su costo en el clarificador BTR para su operación con y sin floculante, según corresponda, como alternativas a evaluar.

- Para realizar el análisis de las pérdidas de sacarosa por inversión en el clarificador se utilizó el siguiente modelo:

$$P = [219818 - 6883t + 54.6t^2]e^{-2.14pH^{1.2}} \tag{Ec. 2.20}$$

Con los valores promedios de las variables temperatura (°C) y pH, determinados en el jugo a la entrada y salida del clarificador cuyos valores se exponen a continuación, se procede a calcular las pérdidas de sacarosa por inversión, siendo estas de 0.01% sacarosa invertida/hora para valores de temperatura promedio de 96°C y pH promedio 7.45.

- Para el cálculo de las pérdidas % sacarosa invertida, resulta necesario, calcular el tiempo de residencia (\mathcal{T}) del jugo en el clarificador calculado mediante el modelo de la ecuación 2.15.
- A partir de que se conozca el tiempo de residencia en el clarificador el cálculo del porcentaje de sacarosa invertida será:

$$\frac{\% \text{Sacarosa invertida}}{h} * \frac{1h}{60min} * \mathcal{T}$$

- Para el cálculo de la Masa de Sacarosa Aparente (Pol), pérdida en el clarificador, resulta necesario el cálculo de esta variable a partir del flujo másico de jugo alimentado al clarificador y su % Pol.
- Cálculo de la masa de sacarosa invertida en el clarificador:

A partir de la masa de jugo alimentado al clarificador y su porcentaje Pol (Sacarosa aparente) se tiene que:

- *Masa de Pol alimentada en el clarificador =*
*Masa de jugo alcalizado y caliente alimentado al clarificador * %Pol de jugo alcalizado*
- *Masa de Pol perdida por inversión =*
*Masa de Pol alimentada al clarificador * %Sacarosa invertida*

Donde:

1. La masa de jugo alcalizado y caliente alimentado al clarificador cuando hay floculante es de 1950326.56 Kg/día.
2. La masa de jugo alcalizado y caliente alimentado al clarificador cuando no hay floculante es de 1748822.508 Kg/día.

- La masa de azúcar Base 96% Pol perdida por inversión será:

$$\text{Masa de azúcar 96\% Pol perdida} = \frac{\text{Masa de Pol perdida en el clarificador}}{0.96}$$

- El costo del azúcar base 96% Pol perdida por inversión será:

Costo del azúcar perdida

$$= \text{Masa de azúcar 96\% perdida} * \text{Precio de venta del azúcar \$/ton}$$

Precio del azúcar: 3200\$/ton (Según referencia de Azcuba (2021))

Tabla 2.6 Resultados de la aplicación de la metodología.

	Variante 1 Con floculante	Variante 2 Sin floculante	Diferencia
Tiempo de residencia <i>T</i> min.	67.35	236.07	
% sacarosa invertida.	0.0112	0.0393	

Masa de Pol alimentada al clarificador Kg/día.	209858.701	234039.187	
Masa de Pol perdida en el clarificador Kg/día.	2350.42	9127.74	
Masa de azúcar base 96%Pol perdida por inversión en el clarificador ton/día	2.44835	9.50806	7.05971
Costo del azúcar base 96%Pol perdida por inversión en el clarificador \$/día	7834.720	30425.792	22591.072
Costo del azúcar base 96%Pol perdida por inversión por zafra(100 días de zafra) \$/zafra	783472	3042579.2	2259107.2

Se pudo observar que el porcentaje de sacarosa invertida cuando se utilizó floculante en la dosis planteada, es menor en comparación a cuando no fue utilizada la sustancia floculante.

- Cálculo del efecto económico en azúcar dejada de perder por inversión en el clarificador BTR cuando se aplica floculante:

Base 100 días de zafra

$$Masa\ de\ floculante = \frac{5\ grs}{ton\ de\ caña} * \frac{2645\ ton\ de\ caña}{día} * \frac{100\ días}{zafra} = 1322500 \frac{grs}{zafra} * \frac{1Kg}{1000grs} *$$

$$\frac{1ton}{1000Kg} = 1.322500 \frac{ton\ de\ floculante}{zafra}$$

Precio del floculante Quimifloc 400:12000\$/ton(Molina, 2014)

$$Efecto\ económico = 1.322500 \frac{ton\ de\ floculante}{zafra} * 12000 \frac{\$}{ton} = 15870 \frac{\$}{zafra}$$

-Beneficio económico neto obtenido en la etapa de clarificación de la UEB Abel Santamaría con el uso del clarificador de simple bandeja (BTR), y la adición de floculante Quimifloc 400:

Beneficio económico neto

= Costo del azúcar base 96% Pol dejada de perder

– Costo del floculante empleado

$$\text{Beneficio económico neto} = 2243237.2 \frac{\$}{\text{zafra}}$$

2.7- Elaboración de cartas de control.

Para analizar el comportamiento de los parámetros analizados se realiza cartas de control. El control de calidad es una herramienta que permite de una forma adecuada y consistente analizar procesos con el fin de estudiar su comportamiento y poder evaluarlo, de tal forma que si se hallan procesos fuera de control se puedan hallar las variables que ejercen ese comportamiento. Con la finalidad de que se puedan generar mecanismos que conminen a restablecer el control del proceso de tal forma que se puedan cumplir con las especificaciones planteadas dentro del mismo.

Las cartas de control son la herramienta más poderosa para analizar la variación en la mayoría de los procesos, son gráficas poligonales que muestran en el tiempo el estado de un proceso. Se dice que un proceso está bajo control estadístico cuando presenta causas comunes únicamente. Cuando existen causas especiales el proceso está fuera de control estadístico; las gráficas de control detectan la existencia de estas causas en el momento en que se dan, lo cual permite que podamos tomar acciones al momento, (Conferencia para el control estadístico de procesos) (2017).

Las gráficas de control se usan entre otras cosas:

Para verificar que los datos obtenidos poseen condiciones semejantes.

Para observar un proceso productivo, a fin de poder investigar las causas de un comportamiento anormal.

Al distinguir entre las causas especiales y las causas comunes de variación, dan una buena indicación de cuándo un problema debe ser corregido localmente y cuando se requiere de una acción en la que deben de participar varios departamentos o niveles de la organización.

Se puede decir que un proceso está fuera de control en los siguientes casos:

- Existen puntos fuera de los límites de control.
- Existen 5 o más puntos consecutivos de un mismo lado de la línea central.
- Existen 7 puntos consecutivos en orden ascendente o descendente.
- Existen 2 o 3 puntos consecutivos demasiados cerca de uno de los límites de control.
- A medida que pasa el tiempo es mayor la estabilidad del proceso.

2.8- Conclusiones parciales.

1. La velocidad de sedimentación de partículas floculadas en el jugo de caña depende de la composición del contenido de P₂O₅, Calcio y la adición de floclantes, resultando significativo el empleo de floclante Quimifloc 400 a razón de 5grs/ton de caña.
2. El cálculo del área de sedimentación con la utilización de un modelo matemático experimental que considera el porcentaje de insolubles en el jugo alimentado y el sedimento obtenido, y la velocidad de sedimentación corregida con y sin la aplicación de floclante permitió evaluar el área de sedimentación real teórica para cada alternativa y comparar con la real total instalada, la que satisface los requerimientos del proceso cuando se aplicó floclante.
3. Las pérdidas de sacarosa por inversión durante la clarificación en dependencia al pH del jugo, su temperatura y el tiempo de residencia del jugo en el equipo evaluadas para las alternativas con y sin floclante, puso de manifiesto que dichas pérdidas son mucho menores cuando se aplicó floclante, siendo significativo el azúcar base 96%Pol que se dejaría de perder, para un efecto económico neto de $2243237.2 \frac{\$}{zafra}$ respecto al costo de floclante empleado.
4. El nuevo modelo de clarificador simple bandeja (BTR) por su sencillez, dimensiones geométricas adecuadas y ser un equipo compacto, permite la intensificación de la purificación, no obstante requerir el uso permanente de floclante, sin grandes afectaciones al efecto económico.

Capítulo 3: Análisis de los resultados.

En el presente capítulo se procede a dar respuesta a la metodología propuesta en el capítulo anterior, para esto fue necesario la obtención de una serie de datos recogidos entre los días 2 y 30 (28 días) de marzo, en la zafra 2016 – 2017, con la ayuda del personal calificado en la industria azucarera Abel Santamaría. Para darle cumplimiento al análisis estadístico se utiliza en el programa Statgraphics, el cual nos permite determinar el comportamiento de las diferentes variables empleadas en este trabajo investigativo.

3.1- Análisis estadístico de las variables empleadas.

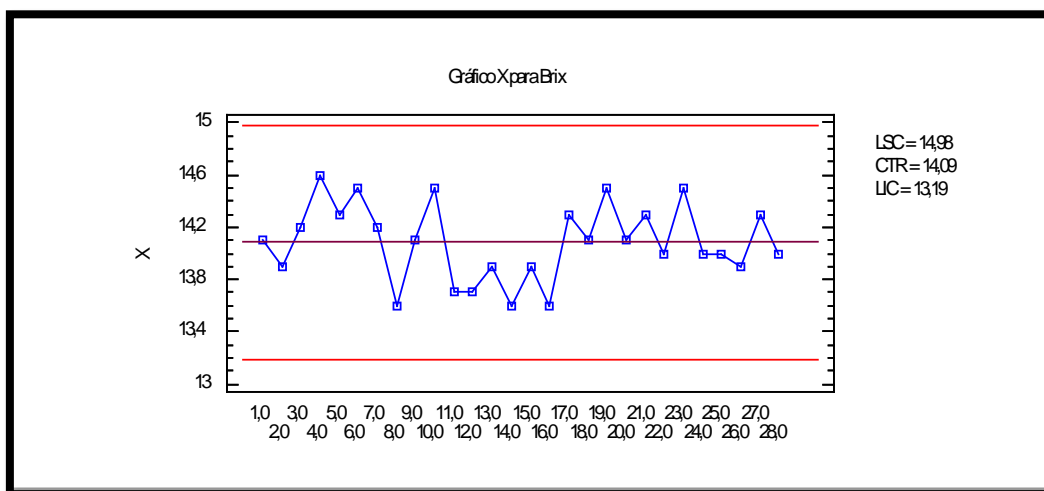
El análisis estadístico se le realiza a diferentes parámetros (Brix, pol y pH) resultantes de los principales jugos que intervienen en la etapa de extracción y purificación, estos son: jugo mezclado, clarificado y filtrado, a cada parámetro se le realizaron tres replicas al día para tener más confiabilidad en los resultados. A continuación se muestra cómo se comportan estas variables dentro del proceso.

- **Análisis estadístico correspondiente al jugo mezclado.**

Con la aplicación de cartas de control de media y rango al jugo mezclado se podrá demostrar si el comportamiento de los diferentes parámetros analizados que intervienen en dicha variable es el adecuado para el buen funcionamiento del proceso.

Los datos necesarios para el análisis estadístico del jugo mezclado se encuentran en las tablas A.1, A.2, A.3 de los anexos.

- Concentración de sólidos solubles en el jugo (Bx).



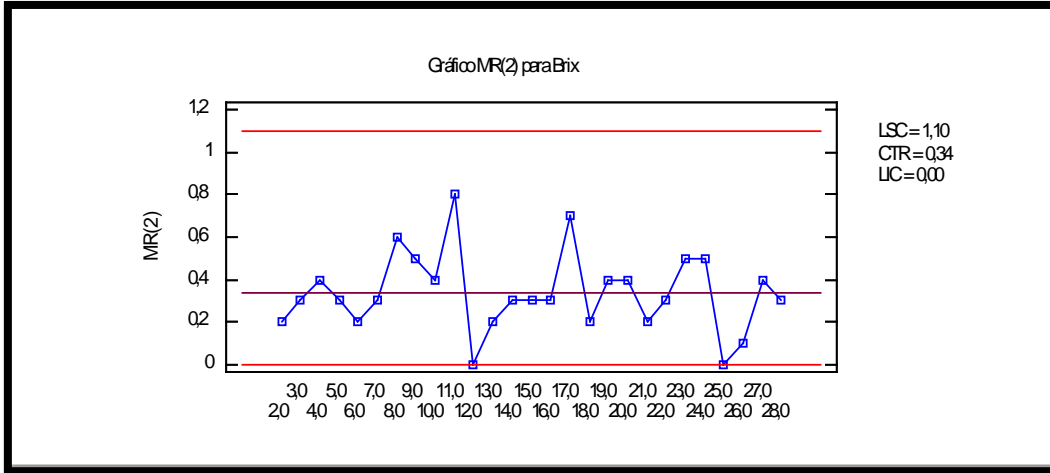
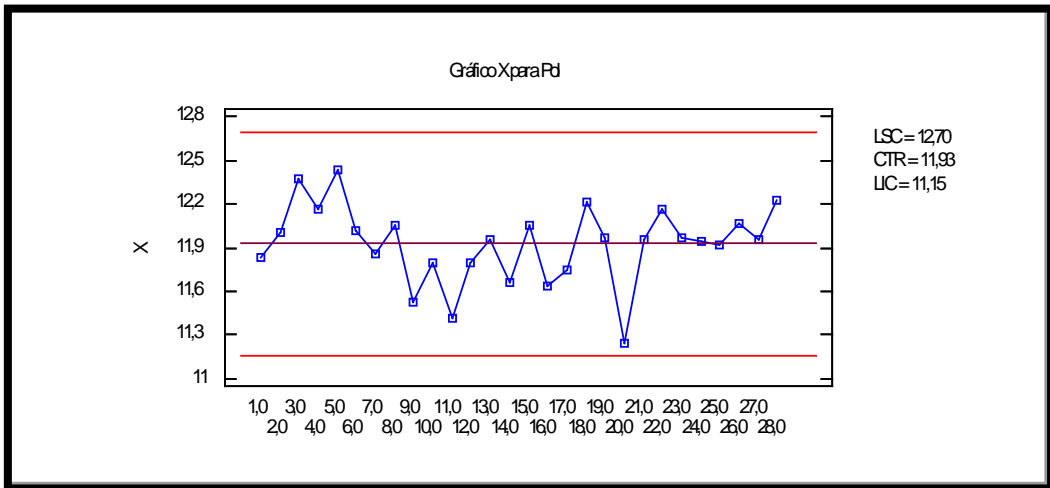


Figura 3.1 Carta de control de media y de rango para la concentración de sólidos solubles (Bx) en el jugo mezclado.

En la figura 3.1 se observa que en la carta de media para el parámetro de concentración de sólidos solubles en el jugo mezclado se localizan todos los puntos dentro de los límites de control establecidos, lo que provoca que este parámetro se encuentre dentro del control estadístico, la media resultante para este conjunto de valores es de 14.09, valor que entra dentro de las exigencias de normalidad (entre 14 y 20) que emplea el manual de operaciones para la fabricación de azúcar crudo (2005), lo cual indica que hubo un buen trabajo en el área de extracción de los jugos garantizando un inicio favorable del proceso.

- Porcentaje de sacarosa en el jugo (Pol).



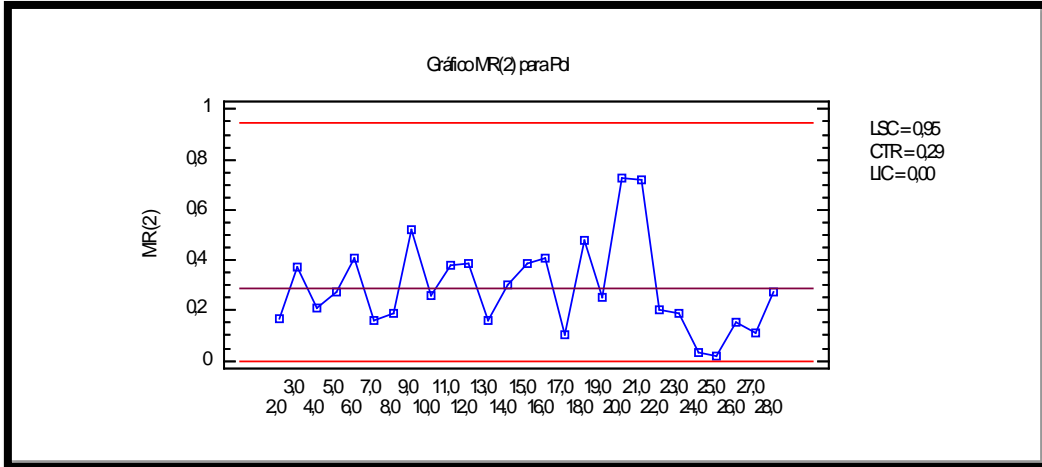


Figura 3.2 Carta de control de media y de rango para el porcentaje de sacarosa (Pol) presente en el jugo mezclado.

En la figura 3.2 se observa que en la carta de media, el parámetro de porcentaje de sacarosa presente en el jugo mezclado se encuentra en control estadístico, pues no existen puntos fuera de los límites establecidos, no aparecen 5 o más puntos consecutivos de un mismo lado de la línea central. Se obtuvo una media de 11.93, valor que cumple con lo establecido por la norma (9 – 17%), establecida por el manual de operaciones para fabricación de azúcar crudo (2005). Concentración hidrogeniónica del jugo (pH).

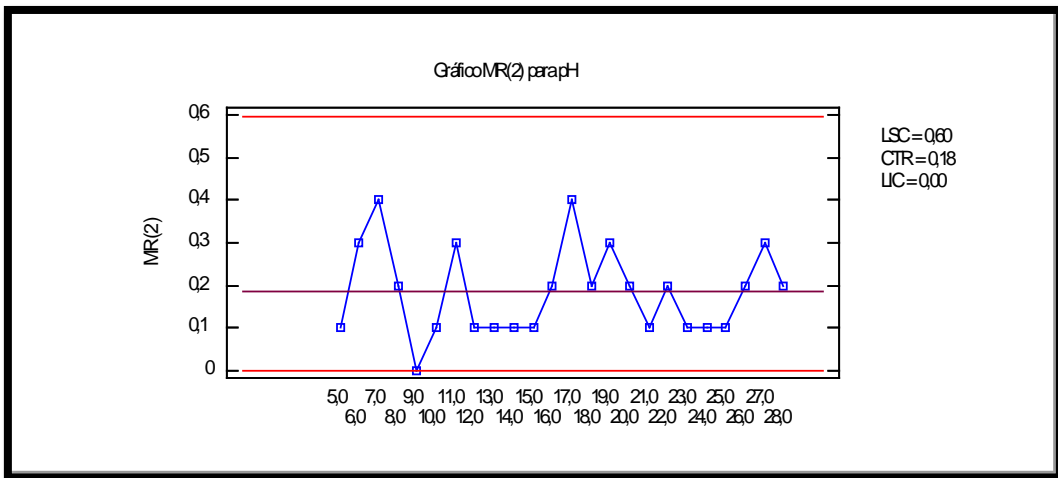
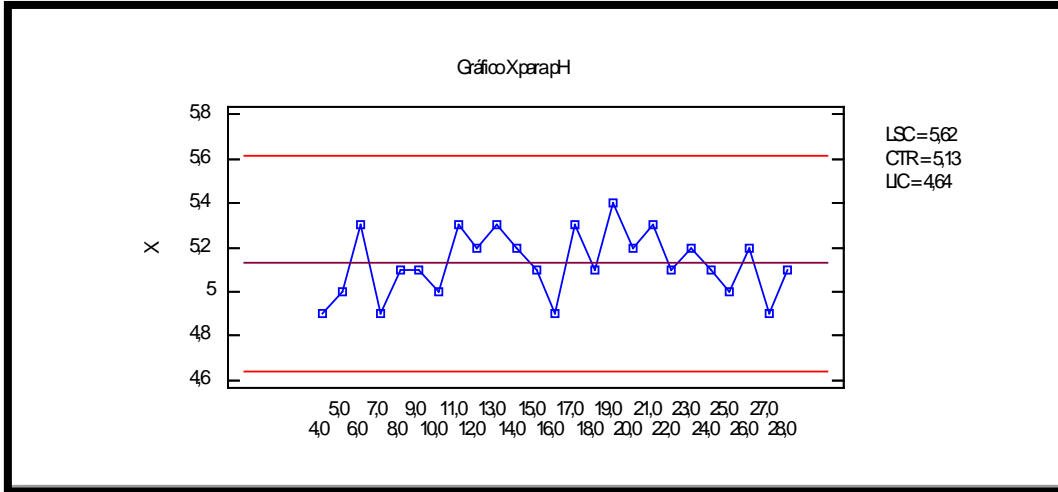


Figura 3.3 Carta de control de media y de rango para la concentración hidrogeniónica (pH) en el jugo mezclado.

En la figura 3.3 se observa que en la carta de media, el parámetro de concentración hidrogeniónica presente en el jugo mezclado se encuentra en control estadístico, pues no existe ningún punto por fuera del límite superior e inferior establecido, lo que demuestra la estabilidad de este parámetro en el proceso, lo cual es favorable para evitar la inversión de la sacarosa en dicho jugo. Se obtuvo una media de 5.13, la cual cumple con lo establecido por el manual de operaciones para la fabricación de azúcar crudo (2005), para una norma de (5 - 5,6

Análisis estadístico correspondiente al jugo clarificado.

Con la aplicación de cartas de control de media y rango al jugo clarificado se podrá demostrar si el comportamiento de los diferentes parámetros analizados que intervienen en dicha variable es el adecuado para el buen funcionamiento del proceso.

Los datos necesarios para el análisis estadístico del jugo clarificado se encuentran en las tablas A.4, A.5, A.6 de los anexos.

- Concentración de sólidos solubles en el jugo (Bx).

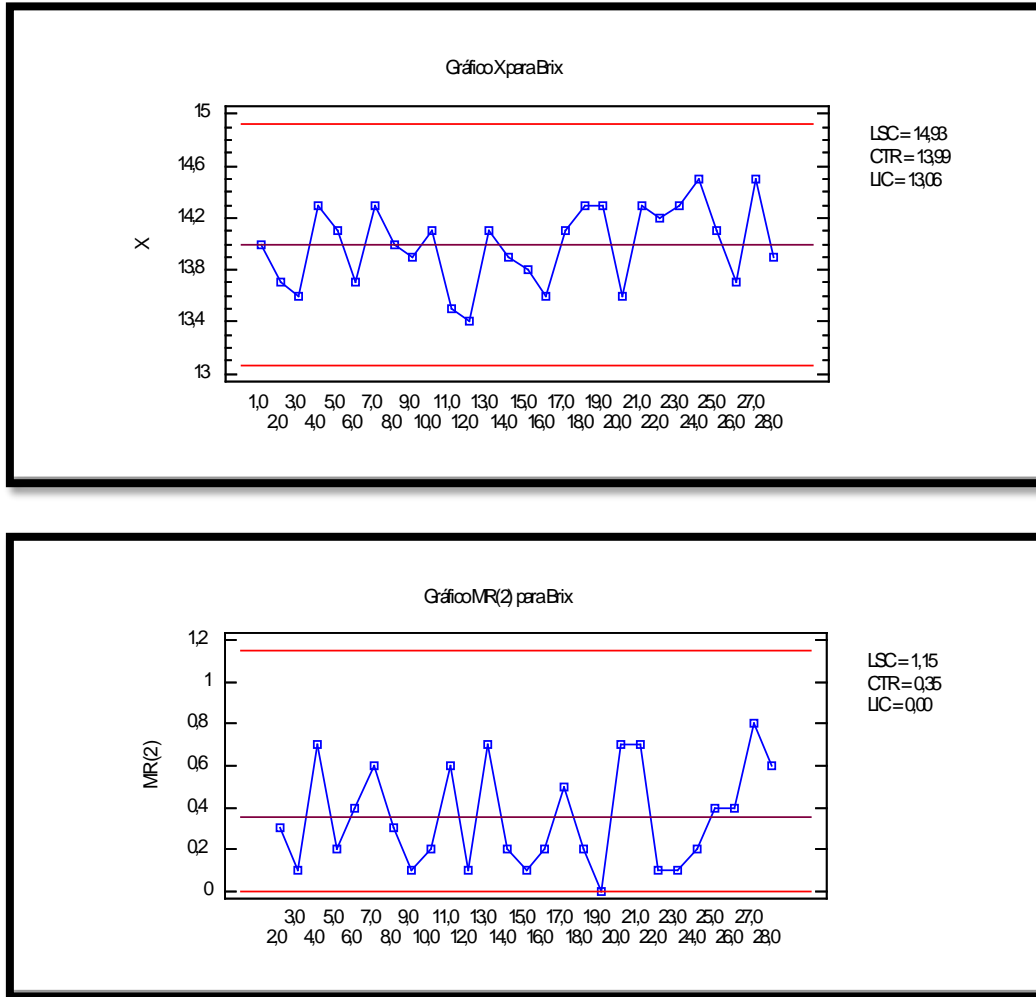


Figura 3.4 Carta de control de media y de rango para la concentración de sólidos solubles (Bx) en el jugo clarificado.

En la figura 3.4 se observa que en la carta de media, el parámetro de concentración de sólidos solubles en el jugo clarificado se encuentra bajo control estadístico, pues todos los puntos se encuentran dentro de los límites establecidos y no existen valores cercanos a los límites, lo que demuestra la estabilidad de este parámetro en el proceso. Se obtuvo una

media de 14 la cual cumple con lo establecido por la norma (14 - 18) que establece el manual de operaciones para la fabricación de azúcar crudo (2005).

- Porcentaje de sacarosa en el jugo (Pol).

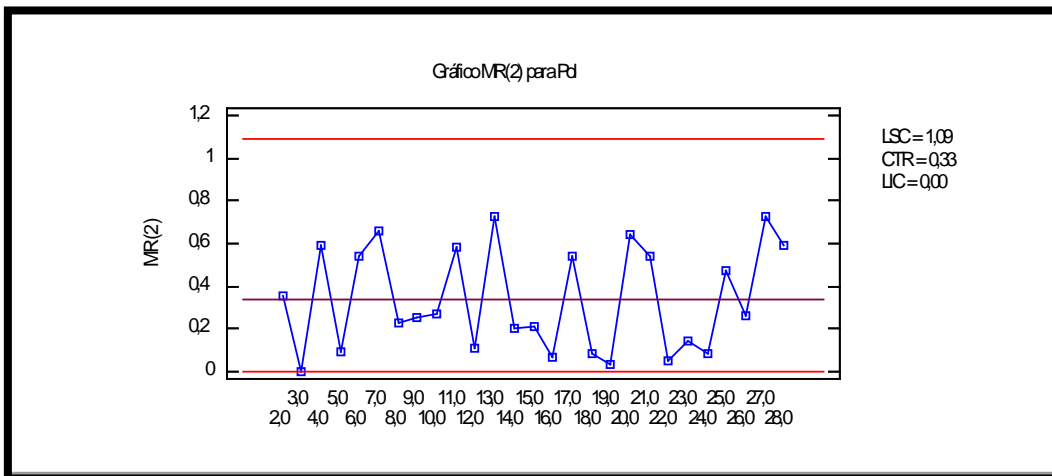
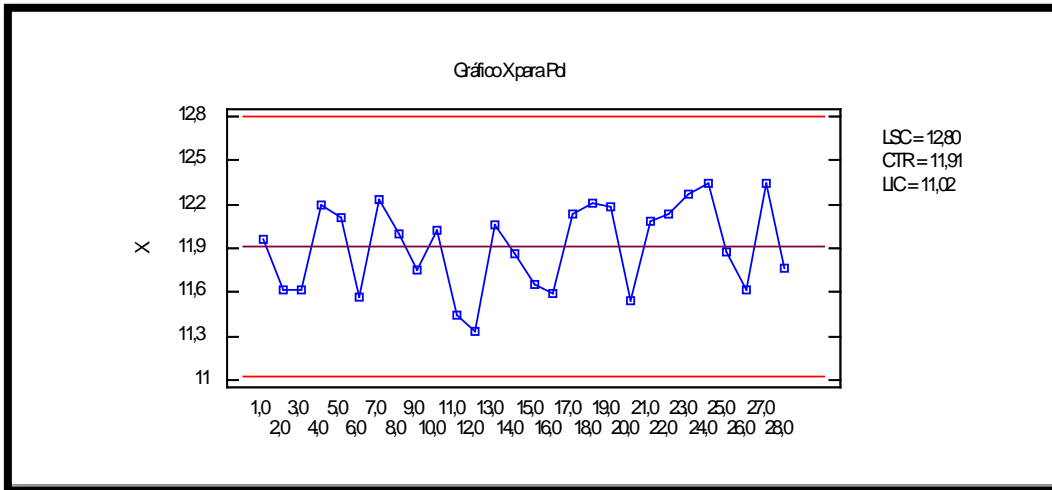


Figura 3.5 Carta de control de media y de rango para el porcentaje de sacarosa (Pol) en el jugo clarificado.

En la figura 3.5 se observa que en la carta de media, el parámetro de porcentaje de sacarosa presente en el jugo clarificado se encuentra bajo control estadístico, se afirma lo anterior pues no existen valores fuera de los límites establecidos, ni cinco o más puntos consecutivos por encima o debajo de la media señalada, por lo que el comportamiento de estabilidad de este parámetro durante estos días es aceptable dentro del proceso. Se obtuvo una media de 11.91, valor que de acuerdo a los especialistas se encuentra entre el rango que garantizaría una buena producción de azúcar de no perderse la misma. Se dispone este valor

de Pol en el jugo clarificado como resultado de la protección de la misma al mantenerse el pH en el rango normado evitando la destrucción de la sacarosa.

- Concentración hidrogeniónica del jugo clarificado (pH).

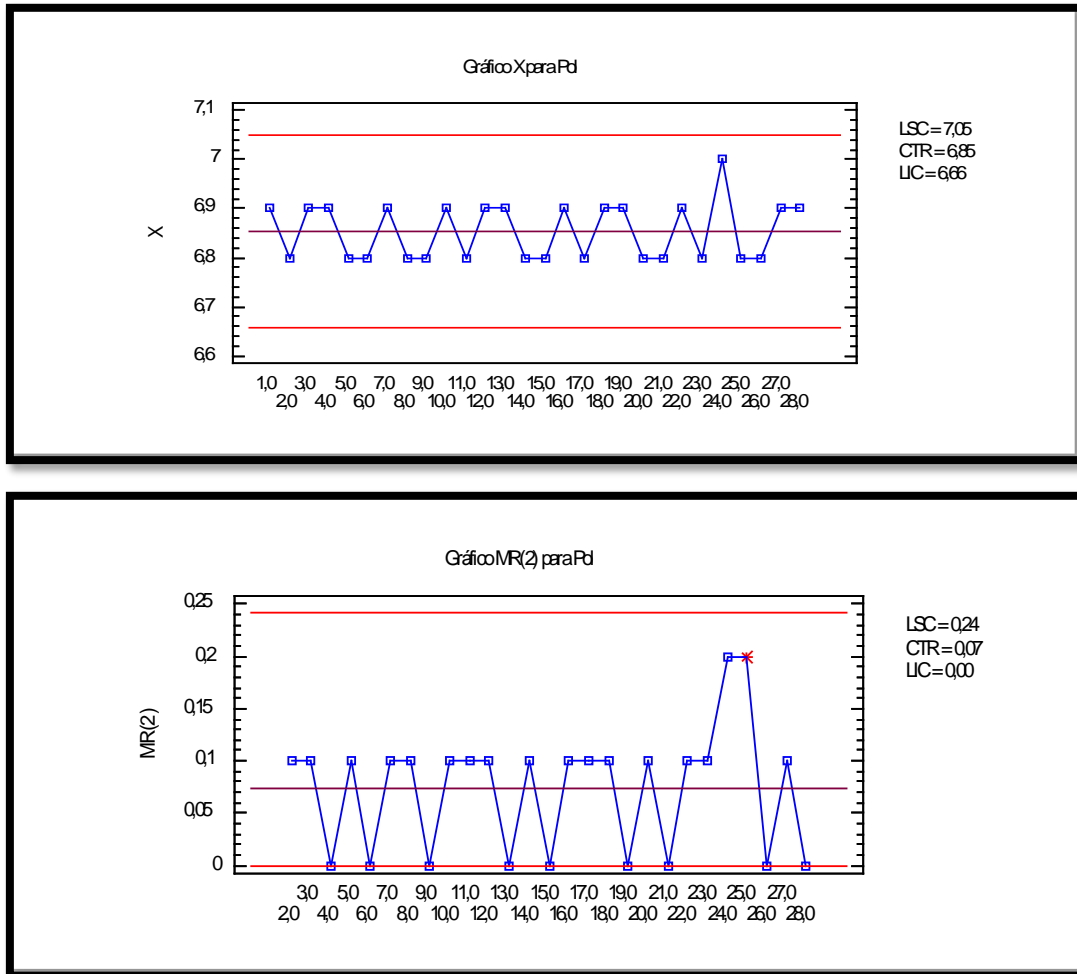


Figura 3.6 Carta de control de media y de rango para el pH en el jugo clarificado.

En la figura 3.6 se observa que en la carta de media, el parámetro de concentración hidrogeniónica presente en el jugo clarificado se encuentra bajo control estadístico, pues todos los puntos se encuentran dentro de los límites establecidos, no existen valores muy cercanos a los límites, lo que demuestra la estabilidad de este parámetro en el proceso. Se obtuvo una media de 6.9, la cual cumple con lo establecido por la norma (6,5 – 7,1) empleada por el manual de operaciones para la fabricación de azúcar crudo (2005), se observa además valores cercanos a la media para todas las mediciones lo cual es muy favorable para el proceso y la obtención del recobrado estimado en el central, además

permite garantizar un valor de color en azúcar deseado, por la no presencia de azúcares reductores en el proceso. El análisis tecnológico efectuado anteriormente es válido.

- **Análisis estadístico correspondiente al jugo que sale de los filtros.**

Con la aplicación de cartas de control de media y rango al jugo filtrado se podrá demostrar si el comportamiento de los diferentes parámetros analizados que intervienen en dicha variable es el adecuado para el buen funcionamiento del proceso.

Los datos necesarios para el análisis estadístico del jugo filtrado se encuentran en las tablas A.7, A.8 de los anexos.

- Concentración de sólidos solubles en el jugo (Bx).

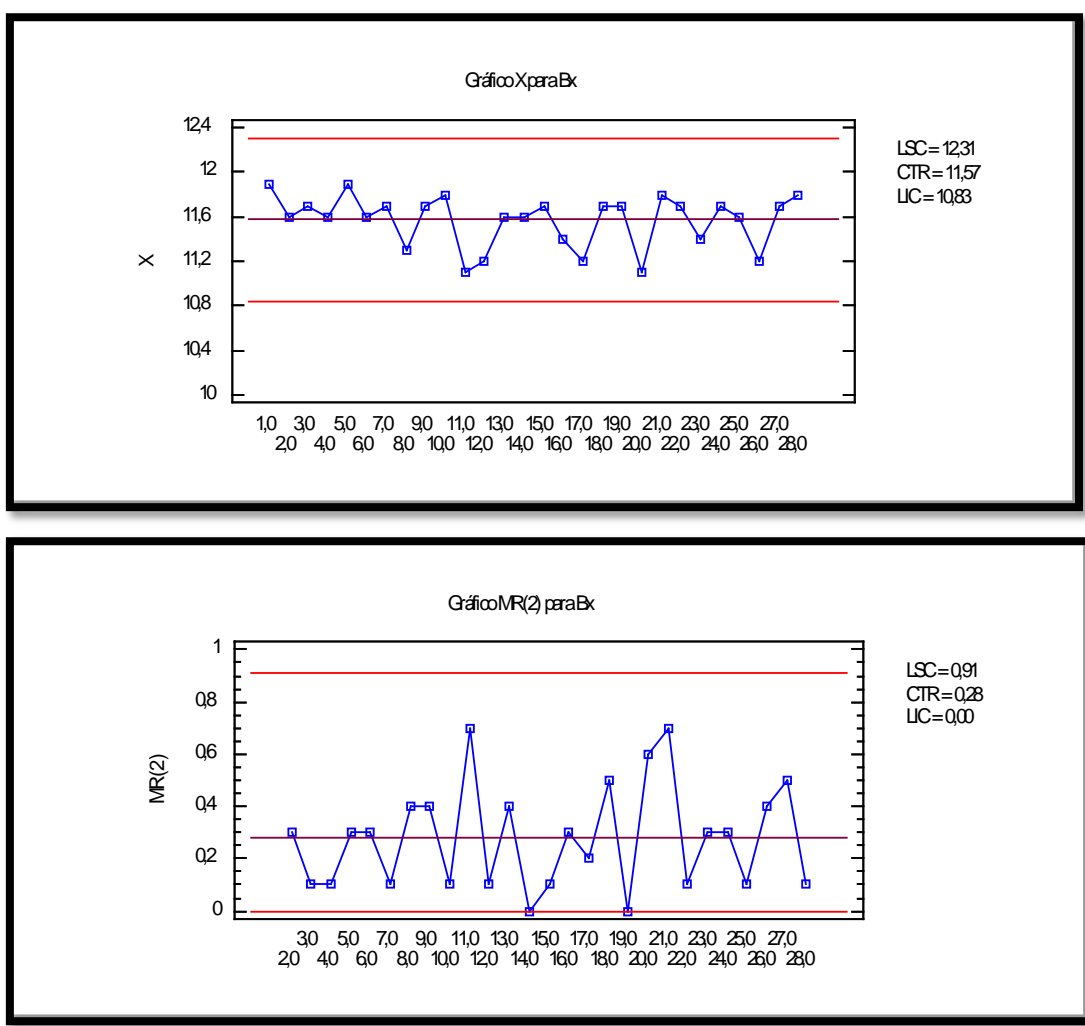


Figura 3.7 Carta de control de media y de rango para la concentración de sólidos solubles (Bx) en el jugo Filtrado.

En la figura 3.7 se observa que en la carta de media, el parámetro de concentración de sólidos solubles en el jugo filtrado se encuentra bajo control estadístico, no existe ningún punto por fuera de los límites establecidos. La media resultante para estos valores graficados es de 11.54, esta se encuentra cercana del rango establecido por la norma (11 - 15) empleada por el manual de operaciones para la fabricación de azúcar crudo (2005), lo cual demuestra que los resultados en el proceso de filtración son aceptables según los parámetros establecidos.

- Porcentaje de sacarosa en el jugo (Pol).

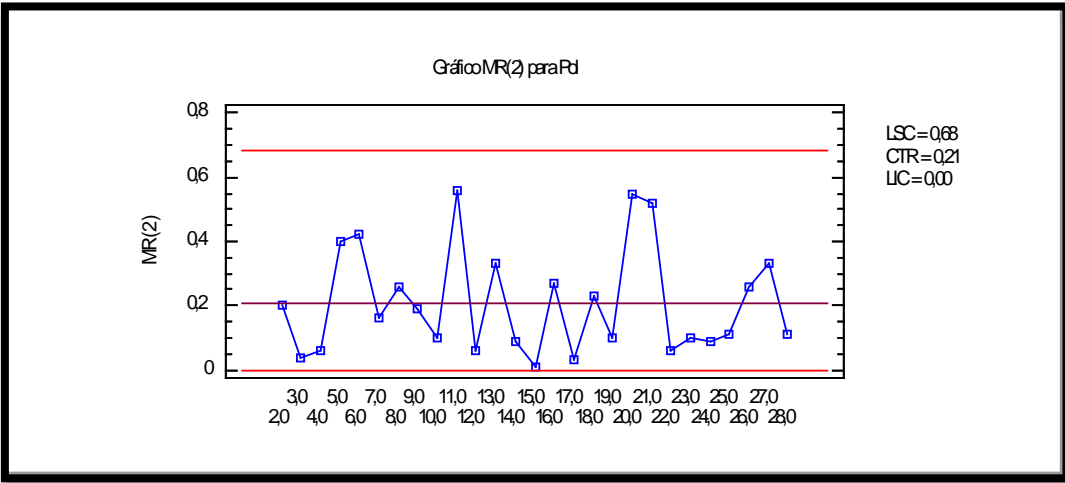
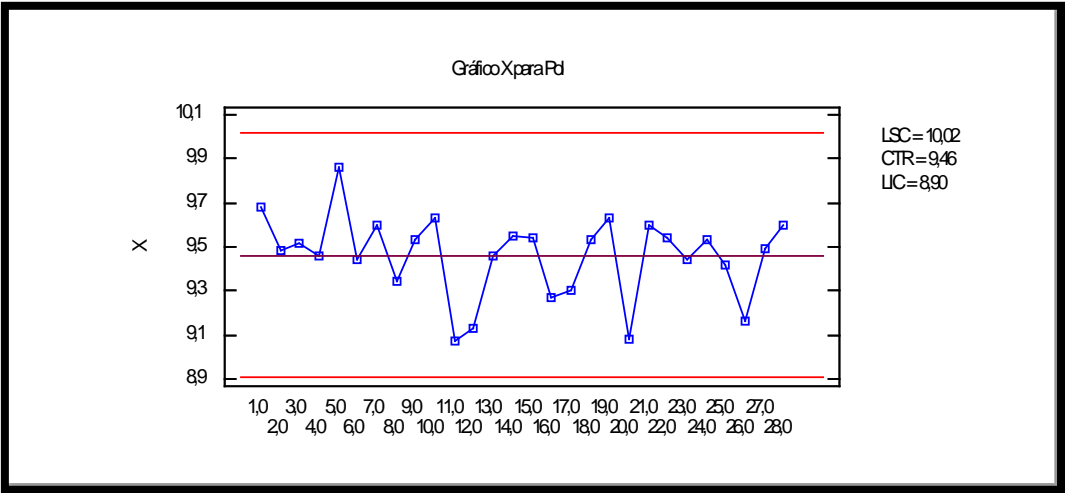


Figura 3.8 Carta de control de media y de rango para el porcentaje de sacarosa (Pol) en el jugo filtrado.

En la figura 3.8 se observa que en la carta de media, el parámetro de porcentaje de sacarosa en jugo filtrado se encuentra bajo control estadístico, pues no existe ningún punto por fuera

del límite superior e inferior establecido. Se obtuvo una media de 9.46, la cual se encuentra dentro del rango establecido por la norma empleada en centrales azucareros cubanos.

3.2- Conclusiones parciales.

Todo lo anterior corrobora el comportamiento de los indicadores analizados en la etapa de purificación, con valores de pH, Pol y Brix en los jugos que durante la etapa de estudio se encontraron dentro de los límites de control establecidos.

Conclusiones

- ✓ El procedimiento de análisis permitió evaluar la etapa de purificación en la producción de azúcar crudo en la UEB Abel Santamaría estando este en correspondencia a la bibliografía consultada para la temática en cuestión.
- ✓ Los resultados que se obtienen en los balances de masa son lógicos y útiles para el análisis del proceso.
- ✓ La velocidad de sedimentación de partículas floculadas en el jugo de caña depende de la composición del contenido de P_2O_5 , Calcio y la adición de floculantes.
- ✓ El área de sedimentación real instalada suple los requerimientos del área de sedimentación requerida sólo con la aplicación de floculantes
- ✓ Las pérdidas de sacarosa por inversión cuando se empleó floculante resultan técnicas y económicamente menores cuando se trabaja en el clarificador BTR.
- ✓ El nuevo modelo de clarificador simple bandeja (BTR) tiene que trabajar necesariamente con la adición de floculante.
- ✓ Se observa como generalidad que los parámetros de Brix, Pol y pH en los jugos: mezclado, clarificado y filtrado se encuentran bajo control estadístico, para un nivel de confianza del 90%, pues no existen puntos por fuera del límite superior e inferior establecido.

Recomendaciones

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos y a las conclusiones arribadas en la investigación se proponen las recomendaciones siguientes:

- ✓ Transmitir a la dirección de la UEB Abel Santamaría los resultados obtenidos en esta investigación.
- ✓ Ampliar el estudio del área de purificación realizando análisis de insolubles en las diferentes corrientes.
- ✓ Continuar el estudio realizado en otras etapas del proceso de producción de azúcar crudo en dicha UEB.
- ✓ El clarificador no es un equipo que funciona independiente al resto de fábrica, el buen funcionamiento de este depende también de garantizar el control de las operaciones periféricas como la alcalización, el calentamiento y la adición de floculantes.

Bibliografía

2005. Manual de operaciones para la fabricación de azúcar crudo.
2011. Manual para la Autogestión de Aprendizaje por Competencia.
2021. RE: Referencia de Azcuba.
2017. Conferencia para el Control estadístico de procesos.
- AGUILAR-RIVERA, N., ALEJANDRE-ROSAS, J. & ESPINOSA-LÓPEZ, R. 2015. Emergency and LCA evaluation of sugar industry in Veracruz, Mexico.
- APARICIO, W. 2005. Proceso de producción de azúcar crudo.
- AUTORES, C. D. 2005. Notas sobre la producción de azúcar crudo.
- BATULE, E. 2009. La química azucarera agrícola e industrial.
- CABALLERO, C. 2013. Industrialización del jugo de caña.
- CLARK, J. 1975. Tecnología general de la producción de azúcar crudo. Dpto. de Capacitación del MINAZ.
- CRUZ, A. 2007. Etapas producción de azúcar crudo.
- CRUZ, A. 2012. Etapas de la producción de azúcar crudo.
- DÍAS, S. 1999. Comportamiento de los azúcares reductores en el proceso de obtención de azúcar crudo. Su influencia en el agotamiento de la miel final. . Tesis de Maestría.
- DOMÍNGUEZ, M. J. 2007. Problemas de la purificación del jugo de caña. Tecnología Química.
- GÓMEZ, J. A. 1999. Características sedimentacionales de jugos de caña orgánica en la Planta Piloto de la UCLV. Influencia del tratamiento térmico en su clarificación. Trabajo de Diploma.
- HONIG, P. 1974. Principios de Tecnología Azucarera. Propiedades de los Azúcares y No-azúcares en la Purificación de los Jugos. .
- HONING, F. W. A. Y. 1959. Principles of Sugar Technology.
- HUGOT, E. 1980. Manual para ingenieros azucareros.
- JENKINS, G. 1971. Introducción a la Tecnología del Azúcar de Caña.
- LAMASARES, M. A. 2010. Informe presentado a la dirección de la UEB “Jesús Rabí.
- LÓPEZ, A. V. 2004. Desarrollo del Archivo Tecnológico de la Planta Piloto José Martí. Trabajo de Diploma.

- MARICHAL, D. 2006. Estudio energético de la zafra azucarera en la empresa Méjico. .
- MARÍN, L. V. 2012. Determinación de las condiciones apropiadas de preparación de un floculante como componente fundamental en el proceso de clarificación de jugo en Riopaila Castilla S.A, planta Riopaila. .
- MOLINA, S. M. 2014. Evaluación de floculantes en la clarificación de jugos de caña de la Unidad Empresarial de Base Jesús Rabí. Trabajo de diploma.
- MORALES, D. 2014. Valoración del sistema de doble semilla en la UEB Central Azucarero Jesús Rabí. .
- MORALES, Y. 2012. Estudio preliminar de la influencia del desvío del jugo secundario en la etapa de clarificación de la empresa Mielera Siboney.
- MOREJÓN, L. 2012. Curso para tecnólogos azucareros. UEB “Jesús Rabí“. .
- MOREJÓN, Y. 2013. Influence of the sugar cane preparation to milling in the sugar production on the Sugar Agroindustrial Complex.
- MORRELL, I. 1985. Tecnología Azucarera.
- PEDROSA, P. 1983. Fabricación de azúcar crudo.
- ROCASOLANO, A. 1917. El Calor como Agente de Coagulación. Real Academia de Ciencias Exactas, Físico-químicas y Naturales de Zaragoza.
- RODRÍGUEZ, L. G. 1982. Investigación y modelación del proceso de purificación de jugo de caña, con el objetivo de su optimización. Tesis Doctoral, Universidad de Las Villas.
- RODRÍGUEZ, L. G. 1986. Intensificación del proceso de purificación. Efectos del tratamiento térmico de los jugos de caña.
- RODRÍGUEZ, M. P. 1985. Manual de operaciones para la producción de azúcar crudo de caña.
- SOTOLONGO, Y. 2017. Evaluación de la etapa de purificación en la producción de azúcar crudo en la UEB Central Azucarero Jesús Rabí. Trabajo de Diploma, Universidad de Matanzas.
- SPENCER, E. 1969. Manual de azúcar crudo de caña.
- STEINDL, R. 2008. Comunicación personal.
- WRIGHT, P. 2005. Consultor Principal, PGW ProSuTech, Australia.

Anexos

Anexo 1

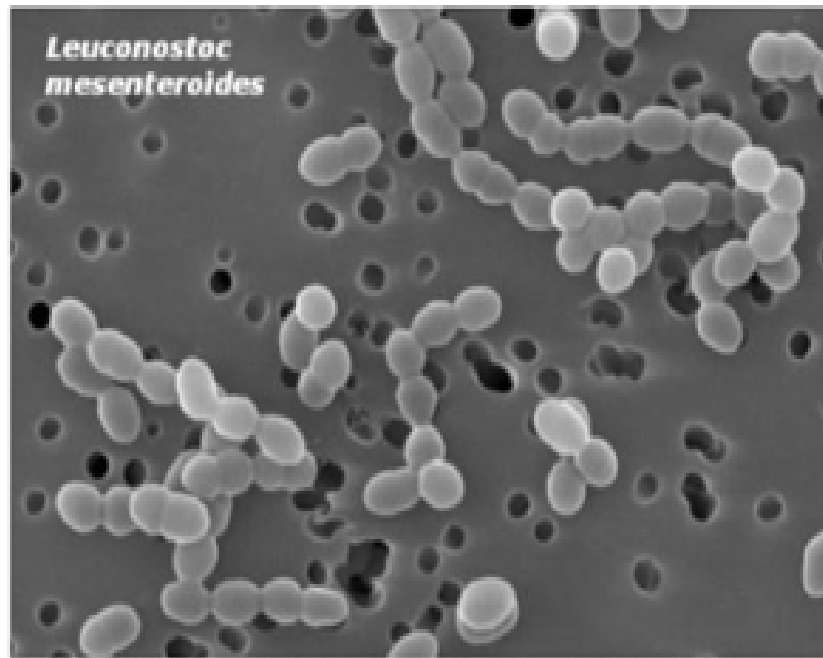


Figura A.1. Bacteria *Leuconostoc* presente en la caña de azúcar.

Anexo 2

Constituyente	Porcentaje	Constituyente	Porcentaje	Constituyente	Porcentaje
sacarosa	75 - 92	Ácidos orgánicos	1 - 3	Sales orgánicas	1,5 - 4,5
glucosa	2 - 4	Aminoácidos	1,5 - 5,5	Gomas	0,3 - 0,6
fructosa	2 - 4	Proteínas	0,5 - 0,6	Ceras y grasas	0,15 - 0,50
Sales inorgánicas	3,0 - 3,4	Almidones	0,001-0,050	Compuestos fenólicos	0,10 - 0,80

Figura A.2. Promedio de la composición química del jugo mezclado (%)

Anexo3

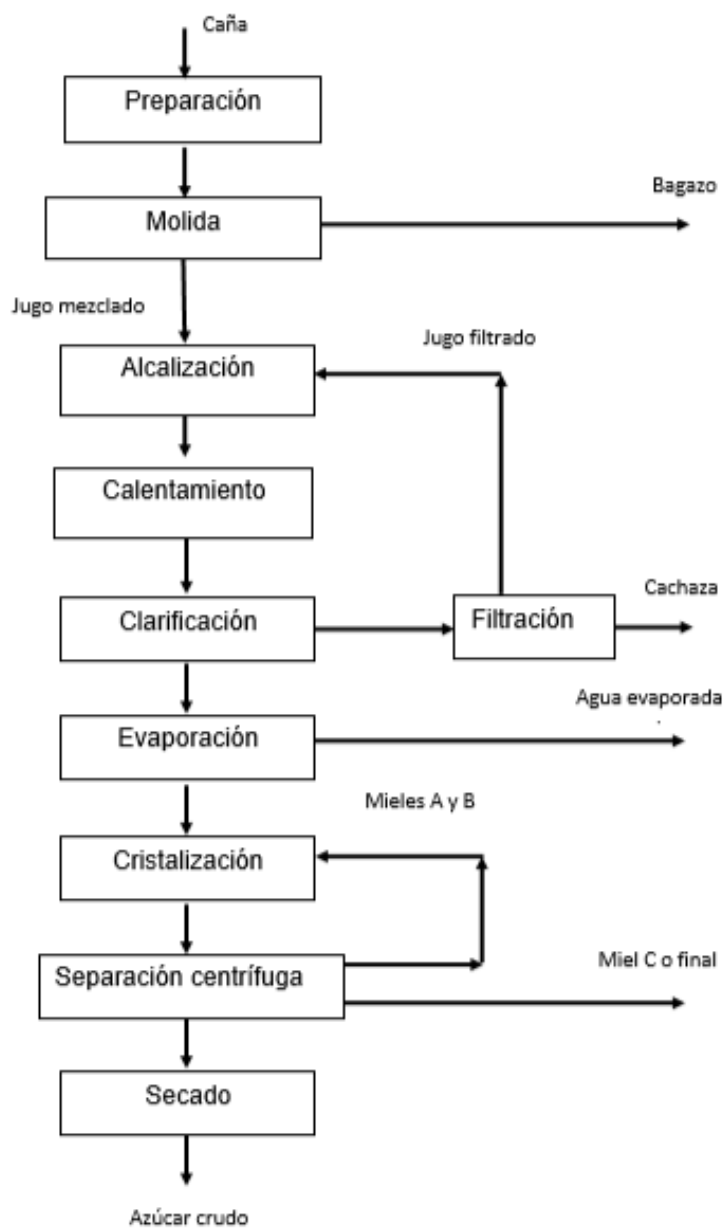


Figura A.3. Esquema del proceso productivo.

Anexo 4



Figura A.4. Proceso de coagulación de las impurezas del jugo diluido utilizando la alcalización en caliente.

Anexo 5

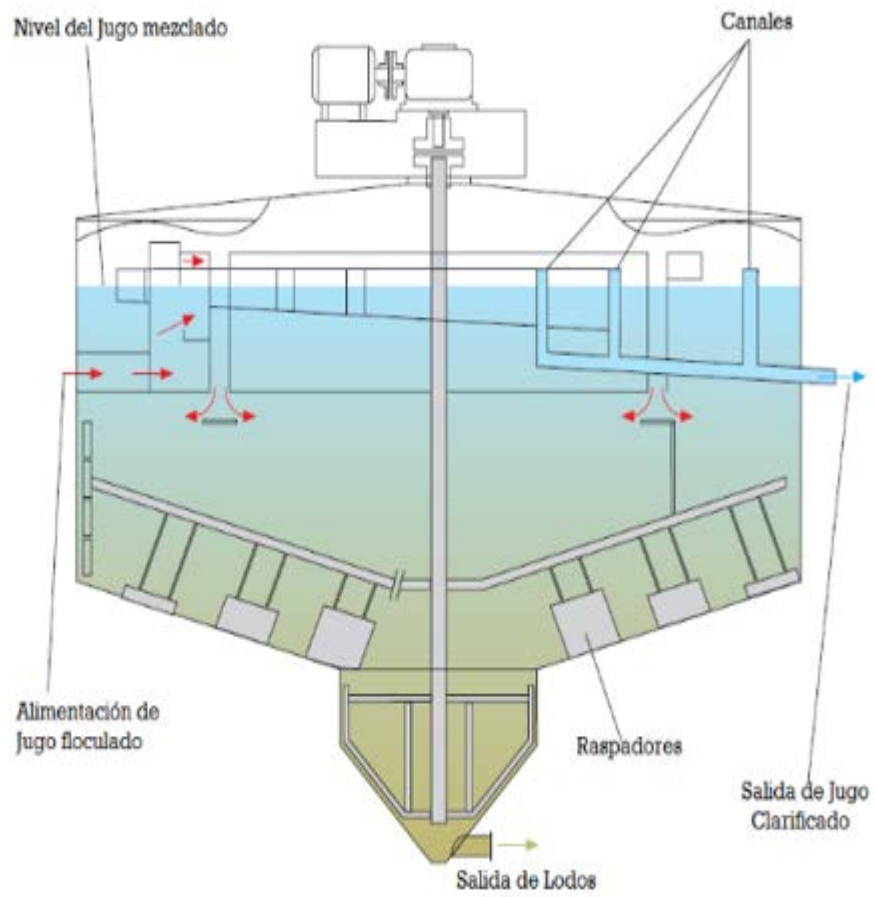


Figura A.5. Clarificador Rápido SRI, diseño original.

Anexo6

Tabla A.1. Valores de concentración de sólidos solubles (Bx) correspondientes al análisis realizado al jugo mezclado.

Días/Réplicas	1	2	3
1	14,1	14	14,2
2	13,9	13,3	13,6
3	14,2	14,6	14,5
4	14,6	13,9	14
5	14,3	13,9	13,1
6	14,5	14,4	14,3
7	14,2	14,1	14,2
8	13,6	14,6	13,3
9	14,1	14,5	13,7
10	14,5	13,9	14,2
11	13,7	14,3	14,5
12	13,7	13,1	13,5
13	13,9	13,6	14,2
14	13,6	14,1	14,7
15	13,9	14,5	14,6
16	13,6	14,3	13,9
17	14,3	14,6	14,4
18	14,1	13,7	14,1
19	14,5	14	14,1
20	14,1	13,7	14,2
21	14,3	13,9	14,2
22	14	13,8	13,9
23	14,5	13,8	14,1
24	14	14	14,6
25	14	13,9	13,8
26	13,9	13,2	13,5
27	14,3	13,8	14,3
28	14	14,2	14,3

Fuente: Sabana de datos del laboratorio de la industria.

Anexo 7

Tabla A.2. Valores de porcentaje de sacarosa (Pol) correspondientes al análisis realizado al jugo mezclado.

Días/Réplicas	1	2	3
1	11,83	12	11,86
2	12	11,77	11,18
3	12,37	12,14	12,52
4	12,16	12,52	11,9
5	12,43	12,21	11,78
6	12,02	12,24	12,28
7	11,86	12,15	11,95
8	12,05	11,54	12,5
9	11,53	11,75	12,25
10	11,79	12,45	12,95
11	11,41	11,52	12,09
12	11,8	11,56	11,15
13	11,96	11,61	11,33
14	11,66	11,43	12
15	12,05	11,86	12,24
16	11,64	11,32	12,4
17	11,74	12,19	12,54
18	12,22	12,17	11,72
19	11,97	12,44	12
20	11,24	11,98	11,49
21	11,96	12,2	11,74
22	12,16	12	11,53
23	11,97	12,38	11,71
24	11,94	11,95	11,96
24	11,92	11,86	10,89
26	12,07	11,75	10,97
27	11,96	12,21	11,57
28	12,23	11,86	12,01

Fuente: Sabana de datos del laboratorio de la industria.

Anexo 8

Tabla A.3. Valores de pH correspondientes al análisis realizado al jugo mezclado.

Días/Réplicas	1	2	3
1	4,9	5,3	5,1
2	5	5,2	5,2
3	5,3	5,3	5,2
4	4,9	5,2	5
5	5,1	5,3	5,3
6	5,1	5,4	5,2
7	5	5,1	5,2
8	5,3	5,2	5,1
9	5,2	5	4,9
10	5,3	4,9	5,2
11	5,2	5,2	5,1
12	5,1	5,2	5,2
13	4,9	5,2	5
14	5,3	5,2	5,1
15	5,1	5,2	5
16	5,3	5,3	5,1
17	5,4	5,2	5,3
18	5,2	5,3	5,1
19	5,3	5,2	5
20	5,1	5	5,2
21	5,2	5,1	5,3
22	5,1	5,2	5
23	5	5,2	5,2
24	5,2	5,1	5,3
25	4,9	5,2	5
26	5,1	5,3	5,3
27	5,1	5,2	5,3
28	4,9	5,3	5,1

Fuente: Sabana de datos del laboratorio de la industria.

Anexo 9

Tabla A.4. Valores de concentración de sólidos solubles (Bx) correspondientes al análisis realizado al jugo clarificado.

Días/Réplicas	1	2	3
1	14	13,2	13,3
2	13,7	14	14,3
3	13,6	14,1	14,5
4	14,3	13,4	13,5
5	14,1	14,4	13,6
6	13,7	14,7	14,4
7	14,3	13,6	13,8
8	14	13,5	14,3
9	13,9	14,2	13,6
10	14,1	14,7	14,4
11	13,5	13,7	14,1
12	13,4	13,8	14,4
13	14,1	13,9	14,5
14	13,9	13,6	14
15	13,8	14,5	14,2
16	13,6	14,6	14,8
17	14,1	14,5	13,6
18	14,3	13,8	13,7
19	14,3	15	14,5
20	13,6	13,8	13,9
21	14,3	14,5	13,9
22	14,2	13,1	13,5
23	14,3	13,9	14,3
24	14,5	13,8	14,3
25	14,1	14,5	13,7
26	13,7	14,3	13,9
27	14,5	14,2	13,5
28	13,9	13,2	13,8

Fuente: Sabana de datos del laboratorio de la industria.

Anexo 10

Tabla A.5. Valores de porcentaje de sacarosa (Pol) correspondientes al análisis realizado al jugo clarificado.

Días/Réplicas	1	2	3
1	11,96	12,58	11,12
2	11,61	11,91	11,81
3	11,61	12,24	12,15
4	12,2	12,05	11,2
5	12,11	11,8	12,42
6	11,57	12,31	12,58
7	12,23	12,05	11,51
8	12	11,79	11,54
9	11,75	12,32	12,09
10	12,02	12,6	12,55
11	11,44	11,81	11,67
12	11,33	12,12	12,15
13	12,06	12,14	11,72
14	11,86	12,15	11,57
15	11,65	11,97	12,34
16	11,59	11,29	12,58
17	12,13	12,22	12,54
18	12,21	12,35	11,87
19	12,18	11,81	12,71
20	11,54	12,11	11,72
21	12,08	11,72	12,35
22	12,13	12,75	11,15
23	12,27	12,06	11,9
24	12,35	12,21	11,65
25	11,88	11,59	12,54
26	11,62	11,74	12,25
27	12,35	11,72	12,11
28	11,76	12,54	11,12

Fuente: Sabana de datos del laboratorio de la industria.

Anexo 11

Tabla A.6. Valores de pH correspondientes al análisis realizado al jugo clarificado.

Días/Réplicas	1	2	3
1	6,9	6,8	6,8
2	6,8	6,9	6,9
3	6,9	7	7
4	6,9	7	7
5	6,8	7	7
6	6,8	6,8	6,8
7	6,9	7	6,8
8	6,8	6,8	7
9	6,8	6,8	6,9
10	6,9	6,9	7
11	6,9	7	7
12	6,8	7	7
13	6,8	7	6,8
14	6,9	6,8	7
15	6,8	6,9	6,9
16	6,9	6,8	7
17	6,9	7	7
18	6,8	7	6,8
19	6,9	7	6,8
20	6,8	7	7
21	6,8	6,8	6,9
22	6,9	6,9	6,9
23	6,8	6,9	6,9
24	7	6,8	6,9
25	6,8	6,9	6,9
26	6,8	7	6,9
27	6,9	7	7
28	6,9	6,8	7,8

Fuente: Sabana de datos del laboratorio de la industria.

Anexo 12

Tabla A.7. Valores de concentración de sólidos solubles (Bx) correspondientes al análisis realizado al jugo filtrado.

Días/Réplicas	1	2	3
1	11,9	11,6	11,7
2	11,6	11,4	11,7
3	11,7	11,5	11,3
4	11,6	11,3	11,4
5	11,9	11,3	11,8
6	11,6	11,3	11,2
7	11,7	11,6	11,2
8	11,3	11,4	11,2
9	11,7	11,3	11,5
10	11,8	11,6	11,8
11	11,1	11,3	11,2
12	11,2	11,1	11,3
13	11,6	11,5	11,3
14	11,6	11,3	11,2
15	11,7	11,4	11,2
16	11,4	11,8	11,6
17	11,2	11,5	11,9
18	11,7	11,3	11,5
19	11,7	11,4	11,5
20	11,1	11,3	11,4
21	11,8	11,5	11,7
22	11,7	11,4	11,6
23	11,4	11,6	11,4
24	11,7	11,5	11,2
25	11,6	11,4	11,9
26	11,2	11,5	11,7
27	11,7	11,3	11,5
28	11,8	11,9	11,7

Fuente: Sabana de datos del laboratorio de la industria.

Anexo 13

Tabla A.8. Valores de porcentaje de sacarosa (Pol) correspondientes al análisis realizado al jugo filtrado.

Días/Réplicas	1	2	3
1	9,68	9,49	9,5
2	9,48	9,42	9,54
3	9,52	9,29	9,17
4	9,46	9,1	9,19
5	9,86	9,32	9,82
6	9,44	9,17	9,04
7	9,6	9,46	9,03
8	9,34	9,39	9,24
9	9,53	9,12	9,36
10	9,63	9,46	9,6
11	9,07	9,26	9,2
12	9,13	9,14	9,26
13	9,46	9,39	9,21
14	9,55	9,33	9,19
15	9,54	9,27	10,02
16	9,27	9,58	9,49
17	9,3	9,48	9,7
18	9,53	9,19	9,34
19	9,63	9,27	9,34
20	9,08	9,32	9,51
21	9,6	9,34	9,5
22	9,54	9,14	9,44
23	9,44	9,42	9,26
24	9,53	9,34	9,02
25	9,42	9,27	9,7
26	9,16	9,5	9,51
27	9,49	9,2	9,34
28	9,6	9,7	9,5

Fuente: Sabana de datos del laboratorio de la industria.