



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA

**DETERMINACIÓN DE LA PÉRDIDA DE AZÚCAR POR EXCESO
DE LAVADO EN UNA CENTRÍFUGA SEMIAUTOMÁTICA 1.22m x
0.76m INGENIO TRINIDAD. ESCUINTLA, GUATEMALA**

LUIS LEONARDO CUTZ SAQUIMUX

Asesorado por Ing. Michele Pagliara Valz.

Guatemala, noviembre de 2004

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DETERMINACIÓN DE LA PÉRDIDA DE AZÚCAR POR EXCESO
DE LAVADO EN UNA CENTRÍFUGA SEMIAUTOMÁTICA 1.22m x
0.76m INGENIO TRINIDAD. ESCUINTLA, GUATEMALA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN
PRESENTADO A JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

LUIS LEONARDO CUTZ SAQUIMUX
ASESORADO POR ING. MICHELE PAGLIARA VALZ.

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE
INGENIERO QUÍMICO

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2004

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Sydney Alexander Samuels Milson
VOCAL I	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL II	Lic. Amahán Sánchez Álvarez
VOCAL III	Ing. Julio David Galicia Celada
VOCAL IV	Br. Kenneth Issur Estrada Ruiz
VOCAL V	Br. Elisa Yazminda Vides Leiva
SECRETARIO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Sydney Alexander Samuels Milson
EXAMINADOR	Ing. Rodolfo Espinosa Smith
EXAMINADOR	Ing. Otto Raúl De León De Paz
EXAMINADOR	Ing. Williams Alvarado Mejilla
SECRETARIO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado

DETERMINACIÓN DE LA PÉRDIDA DE AZÚCAR POR EXCESO DE LAVADO EN UNA CENTRÍFUGA SEMIAUTOMÁTICA 1.22m x 0.76m INGENIO TRINIDAD. ESCUINTLA, GUATEMALA

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química con fecha 20 de Abril de 2004

Luis Leonardo Cutz Saquimux

ACTO QUE DEDICO A:

DIOS Por brindarme el valioso don de la vida, razón de mí existir, quien me dota de sabiduría, entendimiento e inteligencia.

MI MADRE Por su apoyo y amor incondicional.

MI ESPOSA Como un regalo.

MIS HIJOS Que este logro académico, le sirva como ejemplo para lograr muchos triunfos en su vida futura.

MIS HERMANOS Y SOBRINOS Por su amor incondicional.

MIS CUÑADOS Por su cariño.

MIS AMIGOS Ingeniero Michele Pagliara, ingeniero Rodolfo Espinosa e ingeniero José Orozco.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTADO DE SÍMBOLOS	VIII
GLOSARIO	IX
RESUMEN	XXI
OBJETIVOS	XXIII
INTRODUCCIÓN	XXV
1. GENERALIDADES DE LA SACAROSA	1
1.1 Definición	1
1.2 Propiedades físicas	1
1.2.1 Solubilidad	1
1.2.2 Efecto de la temperatura en la viscosidad	2
2. PROCESO PARA LA ELABORACIÓN DEL AZÚCAR CRUDO DEL INGENIO TRINIDAD	3
2.1 Pesaje de la caña	3
2.2 Lavado de la caña	4
2.3 Preparación de la caña	5
2.3.1 Mediante cuchillas giratorias	5
2.3.2 Desfibradora	5
2.3.3 Desmenuzadoras	6
2.4 Molienda	6
2.5 Extracción del jugo	7
2.6 Colado del jugo	8
2.6.1 Bagazo	8

2.7	Alcalización	9
2.8	Calentamiento	10
2.9	Clarificación	11
2.10	Filtración	12
2.11	Evaporación	13
2.12	Cristalización	14
2.13	Centrifugación	14
2.14	Secado	15
2.15	Almacenamiento	16
3.	CENTRÍFUGAS	17
3.1	Función	17
3.2	Tipos	18
3.2.1	Centrífugas continuas	18
3.2.1.1	Partes de una centrífuga continua	19
3.2.1.1.1	Envolvente	19
3.2.1.1.2	Canasto	19
3.2.1.1.3	Telas y contrátelas	19
3.2.1.1.4	Tubo alimentador	20
3.2.1.1.5	Sistema de lavado	20
3.2.1.1.6	Compartimiento de mieles	20
3.2.1.1.7	Soporte	20
3.2.1.1.8	Movimiento	20
3.2.1.2	Capacidad de las centrífugas continuas	21
3.2.2	Centrífugas discontinuas o por lote	22
3.2.2.1	Partes	22
3.2.2.1.1	Compuerta de alimentación	22

3.2.2.1.2	Canasto	22
3.2.2.1.3	Telas y contrátelas	24
3.2.2.1.4	Sistema de lavado	24
3.2.2.1.5	Envolvente	24
3.2.2.1.6	Cabezal	24
3.2.2.1.7	Freno y motor	24
3.2.2.1.8	Temporizadores y controles	25
3.3	Capacidad de las centrífugas automáticas	25
3.4	Tiempos de las operaciones de una centrífuga por lote	26
4.	PROCESO PARA DETERMINAR LA PÉRDIDA DE AZÚCAR POR EXCESO DE LAVADO EN EL INGENIO TRINIDAD	29
4.1	Metodología	29
5.	ANÁLISIS DEL RESULTADO DEL PROCESO	37
5.1	Disminución del peso	37
5.2	Porcentaje de recirculación de agua	40
5.3	Aumento de la pureza de miel	42
5.4	Costos	44
	CONCLUSIONES	47
	RECOMENDACIONES	49
	BIBLIOGRAFÍA	51

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1	Báscula para pesar la caña de azúcar	3
2	Mesa de lavado de la caña de azúcar	4
3	Cuchillas giratorias para preparación de la caña de azúcar	5
4	Desfibradora de la caña de azúcar	5
5	Molino de tres rodillos	7
6	Estación de cuatro molinos	7
7	Colador DSM	9
8	Estación de alcalización	10
9	Estación de calentamiento	11
10	Clarificador rapi dorr 444	12
11	Estación de filtración	13
12	Estación de evaporación en cuádruple efecto	14
13	Estación de cristalización para tres cocidas	15
14	Centrífuga Continua	18
15	Centrífuga discontinua o por lote	23
16	Diagrama de flujo de las pruebas	31
17	Disminución del peso de azúcar descargada por lote respecto a $t = 5$ s	39
18	Diferencia de los promedios del azúcar descargada en kg de cada lote, para cada tiempo de lavado respecto a $t = 5$ s	40
19	Porcentaje de recirculación de agua vrs. tiempo de lavado	41

20	Pureza de la miel para cada tiempo de lavado	43
21	Costo del azúcar por lote que no se envasa respecto a $t = 5$ s	45

TABLAS

I	Centrífugas contlnuas	21
II	Capacidad de las centrífugas automáticas	25
III	Tiempo en segundos de las operaciones de una centrífuga por lote y ciclo total para azúcar blanco y crudo	26
IV	Prueba No. 1	32
V	Prueba No. 2	32
VI	Prueba No. 3	32
VII	Prueba No. 4	33
VIII	Prueba No. 5	33
IX	Prueba No. 6	33
X	Prueba No. 7	34
XI	Prueba No. 8	34
XII	Prueba No. 9	34
XIII	Capacidad de las boquillas de lavado de 0.00159 m de orificio, para diferentes tamaños de centrífuga	35
XIV	Pesos promedios en kilogramos de azúcar descargada y porcentaje de disminución del peso respecto a $t = 5$ s	38
XV	Volumen de agua de lavado utilizada y porcentaje de agua recirculada, respecto a $t = 5$ s	41
XVI	Promedio de los porcentajes de la pureza de la miel para los diferentes tiempos de lavado	42
XVII	Valores promedios de las lecturas polarimétricas y °brix para la miel	43

XVIII Peso y costo del azúcar por lote que no se envasa para cada tiempo de lavado, respecto a $t = 5$ s

44

LISTA DE SÍMBOLOS

Pa	Unidad de presión.
m³/s	Metro cúbico sobre segundo (flujo).
m³	Metro cúbico (volumen).
s	Segundo (tiempo).
Kg	Kilogramo (masa).
m	Metro (longitud).
K	Grados kelvin (temperatura).
Watt	Watt (potencia).
Kg/m³	Kilogramo sobre metro cúbico (densidad).
m²	Metro cuadrado (área).
m/s	Metro sobre segundo (velocidad).
°	Grados (ángulo).

GLOSARIO

Acidez	Medida de la concentración de ácidos en el jugo de caña efectuada para disponer de un índice de descomposición y del consumo de cal para neutralizar (es un mejor indicador que el de pH del jugo dado que muchos de los ácidos presentes forman de hecho una solución amortiguada que no acepta cambios de pH).
Agua Condensada	Agua que proviene del vapor que ha donado su calor latente en la calandria de un evaporador, para después de ésto transformarse en líquido, a lo cual se le llama también condensado.
Agotamiento	Propiedad que tienen las mieles de un sistema de tres masas cocidas, que implica la posibilidad de recuperar la mayor cantidad de azúcar posible a partir de ellas.
Albúmina	Compuesto químico con características de amina, que se utiliza para provocar la pérdida de color en una solución azucarada.
Amortiguada	Solución cuyo pH cambia al agregársele un ácido o una base, menos que si se le agrega agua pura.

Azúcar blanco	Azúcar que ha sufrido la pérdida de color al pasar por un proceso de sulfitación por medio de anhídrido sulfuroso. Este azúcar también llamado de consumo directo, es el que se cuece directamente a partir del jugo de caña concentrado.
Azúcar crudo	Azúcar que proviene directamente del proceso normal de formación del azúcar utilizando únicamente como producto químico la cal hidratada, como neutralizador de acidez y de suciedad. Ésta se utiliza para su posterior trato en una refinería.
Base	Molécula o ión que acepta un protón.
Bagazo	Subproducto final de la caña de azúcar, que es utilizado como fuente de energía para un ingenio azucarero.
Bagacillo	Materia proveniente de la molienda de la caña de azúcar en una estación de molinos, materia de muy pequeñas dimensiones que se encuentra mezclada con el jugo. Tiene un uso práctico en los filtros al vacío, para poder conseguir una filtración más eficiente, esto dependiendo del tamaño de la partícula.
Báscula	Equipo utilizado para determinar el peso de todo tipo de materia sólida o líquida, dependiendo la forma y el diseño que tenga.

Batch o lote	Palabra del lenguaje inglés que significa lote, se dice de un proceso en el cual una cantidad de materia se introduce en un recipiente para su procesamiento y posterior descarga, al llegar a su punto de procesamiento ideal. Es el proceso contrario a uno continuo.
Brix	Es una unidad de medida que expresa el por ciento en peso de sólidos disueltos en una solución pura de sacarosa. Es el porcentaje de sólidos totales (azúcares y no azúcares), disueltos en el jugo.
Cachaza	Se le llama así a los lodos de fondo obtenidos en el proceso de clarificación constituidos principalmente por sales de fosfato de calcio y magnesio, gomas, cera, cenizas y agua.
Caldera	Equipo utilizado para la transformación del agua líquida en vapor a una temperatura y presión determinadas con el fin de aprovecharlo como fuente de calor y energía. Pueden ser acuotubulares o pirotubulares, y pueden utilizar como combustible: derivados del petróleo o bagazo.
Canasto	Accesorio de una centrífuga en forma de un tambor perforado que gira en torno de una flecha vertical o eje. El canasto tiene paredes verticales perforadas revestidas hacia el centro, primero con una malla de sostén de alambre de latón y después con una lámina perforada.

Cera	Denominación genérica de una serie de productos naturales de origen animal o vegetal constituidos por ácidos grasos de larga cadena, esterificados con alcoholes. Revestimiento de la caña que precipita en el proceso de clarificación pasando a formar parte de la cachaza.
Condensador	Equipo utilizado en el cambio de estado del agua de gaseoso a líquido, con el objeto de aprovechar ésta en el proceso después de su posterior enfriamiento. Consta de un cuerpo cilíndrico, unido a una parte cónica que finaliza en un largo tubo con salida a la atmósfera.
Cristalización	Proceso que se obtiene cuando una carga de meladura se somete a una evaporación, con posterior sobresaturación y formación de cristales de azúcar que se encontraban disueltos. Este proceso se puede lograr de tres formas diferentes: Por espera, que es una concentración progresiva y dependiente del tiempo, por choque y por semilla, las cuales son cristalizaciones aceleradas.
Cristalizador	El cristalizador es un tanque de acero de sección transversal en forma de U, provisto de un agitador que permite tener a una masa cocida en un movimiento lento y continuo.

Decantación	Proceso fisicoquímico por medio del cual se logra la separación de dos fases distintas, al lograr que una de ellas se separe al pasar por medio de un precipitado formado en el proceso.
Desfibradora	Aparato empleado para la preparación y desintegración de la caña, con el propósito de facilitar la extracción del jugo en la estación de molinos. Su nombre indica la acción que desarrolla a sea cortar en pequeños pedazos y desfibrar.
Desmenuzadora	Máquina constituida por un molino de 2 mazas, cuyas funciones son principalmente: asegurar la alimentación de toda la batería de molinos y preparar la caña, facilitando la toma de ésta por los molinos y la extracción en ellos.
Ebullición	Punto final en el que una masa cualquiera líquida logra vencer la resistencia que la mantiene en ese estado al haber obtenido suficiente energía y pasar al estado gaseoso.
Envolvente	Parte de una centrífuga que consiste en una envoltura metálica alrededor del canasto, cuya función es recoger las mieles expelidas por la fuerza centrífuga.
Extracción	Aquella parte (usualmente porcentaje) de un componente de la caña que es extraída por la molienda.

Flóculo	Es la unión de componentes de materia por medio de diferencia de cargas, que toma una densidad más elevada que el líquido que los contiene y tiende a sedimentarse hacia el fondo del recipiente.
Granel	Sistema de almacenamiento de materiales sólidos en que no se tiene un orden definido, ni están contenidos en recipientes como bolsas, sacos, contenedores. Este sistema por lo general aglomera en el piso de grandes bodegas el producto sólido.
Imbibición	Aplicación de agua a contracorriente con respecto a el movimiento del bagazo de caña en el último molino de una estación de molinos, para que por medio de ésta se logre la dilución de la sacarosa restante en el bagazo y reducir el valor de <i>pol</i> de éste al valor mínimo posible.
Jarabe	Se conoce con este nombre al jugo concentrado proveniente del último efecto de los evaporadores, que luego pasa a su proceso de cristalización. Comúnmente se le conoce como meladura en los países de habla hispana.
Jugo	Mezcla de una sola fase que contiene agua, sólidos disueltos y sólidos en suspensión.

- Lechada de cal** Es la unión de la cal hidratada y el agua, siendo estas dos inmiscibles entre si, que sirve para tener un medio de transporte para el óxido de calcio que colabora con la disminución del pH del jugo crudo de la caña. A pesar del color blanco de la lechada, la cal no está disuelta.
- Licor madre** Se llama así a la miel que es extraída en las centrífugas, por la acción de la fuerza centrífuga que allí se ejerce y luego pasa a los tachos como alimentación para la formación de una nueva masa cocida.
- Maceración** Proceso de molienda por medio del cual todo el jugo extraído en cada uno de los molinos de un tándem, es agregado al bagazo del molino anterior, con el fin de lograr una mejor extracción y lavado. La maceración en el último molino la produce el agua de imbibición.
- Masa B** Producto azucarado concentrado, formado a partir del cocimiento al vacío en un tacho, de la miel proveniente de las centrífugas de primera y la magma proveniente de las centrífugas de tercera. La masa B al pasar por centrífugas de segunda forma la miel B y la magma de segunda.

Masa C	Producto azucarado concentrado, formado a partir del cocimiento al vacío en un tacho convencional, de la miel proveniente de las centrífugas de segunda y una mezcla especial denominada semilla que forma un grano muy pequeño. La masa C al pasar por centrífugas continuas forma lo que es la miel final o melaza y una magma de tercera o magma C.
Masa cocida	Producto formado a partir de la evaporación y cristalización al vacío en un tacho convencional de una mezcla de grano cristalizado y su miel madre. Esta masa cocida se descarga después a una centrífuga para lograr la separación de mieles y azúcares.
Mazas	Rodillos de hierro fundido, con ranuras formando dientes, que son utilizados en los molinos para comprimir la caña de azúcar y extraer el jugo a partir de sus fibras.
Meladura	Producto final de la concentración del jugo de caña en el sistema de efectos de evaporación de un ingenio. Dicho producto se extrae del cuarto efecto a un <i>brix</i> de 60 aproximadamente y es la alimentación principal para la formación de cristales de azúcar en los tachos.
Mezclador	Sistema mecánico consistente en un recipiente en forma de U o cilíndrico, con un sistema de gusano sin fin o simplemente un sistema de aspas. El objetivo de este aparato es lograr una homogenización de una mezcla, principalmente líquida.

Miel	Producto que se obtiene cuando las masas cocidas se procesan en una máquina centrífuga, separándose de los cristales. Se designa con una letra dependiendo de la masa cocida de la que provenga, y cuando no se puede extraer más azúcar, se denomina miel final o miel residual.
Molino	Sistema de mazas utilizadas para crear presión sobre un colchón de caña de azúcar, cuyo propósito es el de extraerle el jugo conductor de sacarosa. Un molino puede constar de tres o cuatro mazas según propósito y diseño.
pH	Expresión utilizada para dar una idea del carácter ácido de una solución acuosa. Su valor es un número real proveniente de la siguiente expresión matemática: $\text{pH} = -\log \{H^+\}$ que se lee como “ el pH de una solución es igual al logaritmo negativo de la concentración de iones hidrógeno”.
Pol	Es el valor obtenido por la dolarización directa o sencilla del peso normal de una solución en un sacarímetro.
Purga	Acción consistente en lograr la separación de dos sustancias con distinta densidad en un aparato determinado y, luego de esto, descargar a tanques o depósitos de almacenamiento. También se conoce con este nombre a la acción de eliminar residuos o excedentes de un proceso.

Rendimiento	Relación matemática que determina cuantas libras de azúcar se obtienen por cada tonelada de caña quemada y cortada. En el ingenio se determina al pesar los quintales de azúcar producida, transformándola a libras al multiplicar por cien y dividir este resultado entre las toneladas de caña ingresadas y pesadas en una báscula.
Sacarosa	Compuesto químico orgánico de fórmula $C_{12}H_{22}O_{11}$, también denominado comúnmente como azúcar y provenientes al grupo de compuestos llamados carbohidratos.
Saturación	Punto físico-químico en el que un sólido deja de ser soluble en agua, creando las dos fases componentes originalmente o sea cristales y agua líquida.
Semilla	Se llama así a la mezcla de jugo o agua con el grano fino de azúcar que se obtiene de la centrifugación de las masas cocidas B y C y, que se usa como pie de templa para la elaboración de una masa cocida en un tacho. También se le llama así a una mezcla de azúcar pulverizada y alcohol isopropílico anhidro, que se prepara para servir de iniciador en los procesos de cristalización.
Soluble	Dícese de la propiedad de los materiales sólidos, líquidos y gaseosos de disolverse en otros materiales en los mismos estados con el fin de formar una sola fase.

Tacho	Aparato consistente en una calandria con entradas de vapor y un cuerpo que aloja a las masas cocidas formadas a partir de la meladura. Se conoce también como evaporador-cristalizador pues su función es llevar un jarabe azucarado a una mayor concentración de sólidos evaporando el agua y por sobresaturación lograr la formación de cristales de azúcar.
Templa	Se conoce con este nombre a la carga completa de masa cocida dentro de un tacho.
Timer	Dispositivo mecánico-eléctrico utilizado en la conexión y desconexión automática de dispositivos eléctricos más grandes en un tiempo determinado, según el operador.
Turbina de vapor	Dispositivo mecánico utilizado en la transformación de la energía cinética propia de un vapor a alta presión a energía mecánica aprovechable en movimientos de los molinos del ingenio.
Vacío	Condición dada en la cual un recipiente cerrado, se ve sometido a un proceso de evacuación de gases y aire con el fin de disminuir su presión interna y reducirla a un valor menor al de la presión atmosférica que rodea a dicho recipiente. Esto se hace con el objeto de disminuir las temperaturas de ebullición para mezclas líquidas azucaradas.

Vapor

Agua en estado gaseoso con una temperatura y presión determinadas, proveniente de la ebullición y vencimiento de la presión de vapor que mantiene las gotas de agua líquida, unidas entre sí. El vapor de agua puede tener varias características y nombres dependiendo la parte del ingenio donde se produce y donde se utiliza o transforma en otro tipo de vapor.

Vasos

Se llama así a cada uno de los aparatos utilizados para la evaporación del agua excedente del jugo de caña con el fin de transformarlo en un producto concentrado llamado meladura. Su capacidad depende de la superficie calórica disponible para la transformación del agua líquida a agua en forma de vapor.

Viscosidad

Se llama así a la fuerza que tienen todos los líquidos de oponerse a fluir. Su unidad de medida son los Poises.

RESUMEN

La industria azucarera ha estado sujeta a constantes modificaciones en sus procesos con el propósito de hacerlo eficiente. Actualmente han abandonado los procesos operativos manuales para pasar a la total automatización, lo cual les ha traído como consecuencia, procesos con más control, parámetros más exactos y empresas operadas con menor cantidad de mano de obra. Esta situación les permite reducción en pérdidas por proceso y la consecuente disminución de los costos de fabricación.

Un paso importante en la evolución de estos procesos es la centrifugación, por medio de la cual se logra la separación de la miel del azúcar aprovechando la diferencia de densidades y la fuerza centrífuga a la que se somete el material. Para lograr una separación más rápida y efectiva se suelen utilizar lavados con agua caliente y a presión y en muchos de los casos el lavado no controlado disuelve el grano, diluyéndolo en la miel que es separada.

Por lo que, a través del presente trabajo realizado en el Ingenio Trinidad, Escuintla, Guatemala, se determina la pérdida de azúcar por exceso de lavado en una centrífuga discontinua o por lote de 1.22m x 0.76m, demostrándose que la mayor parte de pérdida de azúcar se produce en el intervalo de tiempo de $t = 15$ s a $t = 25$ s, debido a que la sacarosa es muy soluble en agua, lo que aumenta la azúcar disuelta de cada lote, estando este en función del número de solubilidad, y que al incrementar los tiempos de lavado se aumenta el porcentaje de recirculación de agua en promedio a $0.0056 \text{ m}^3/\text{s}$ equivalente a 67.91%, lo que redundo en requerimiento de mayor equipo e insumos, además se refleja que el impacto económico del peso y costo del azúcar por lote que no se envasa es en promedio de 26.36 Q/Kg.

Por lo que, se sugiere optimizar el tiempo de lavado del azúcar, en función de las especificaciones del tipo de azúcar que se quiera producir, paralelamente a un análisis de costo/beneficio, para lo cual deberá involucrarse a la alta gerencia del Ingenio Trinidad.

OBJETIVOS

General

Determinar la pérdida de azúcar por exceso de lavado en la etapa de centrifugación en el Ingenio Trinidad, productor de azúcar crudo.

Específicos

1. Determinar la cantidad de azúcar que se pierde al ir aumentando los tiempos de lavado en una centrífuga.
2. Encontrar una representación gráfica de la pérdida de azúcar, a medida que se aumenta el lavado en una máquina centrífuga.
3. Cuantificar el costo del azúcar que se disuelve por exceso de lavado.
4. Determinar los porcentajes óptimos de recirculación de material para cada tiempo de lavado.

INTRODUCCIÓN

La constante diversificación de las empresas que fabrican productos endulzantes, ha motivado que éstas estén en la búsqueda continua de procesos que sean altamente eficientes.

La industria azucarera ha realizado constantes modificaciones que han permitido que las distintas fases de su proceso hayan evolucionado pasando de su fase operativa manual, hasta procesos totalmente automatizados.

La automatización ha traído, como resultado el tener procesos mas controlados, de parámetros más exactos y empresas operadas con menor cantidad de mano de obra. Esta situación ha permitido la reducción de pérdidas por proceso y la consecuente disminución de los costos de fabricación.

La centrifugación en la industria azucarera, es un paso importante del proceso, en el cual se logra la separación de la miel del azúcar a través de la diferencia de densidades y la fuerza centrífuga a la que es sometido el material. Para lograr una separación más rápida y efectiva se suelen utilizar lavados con agua caliente y a presión. En muchos de los casos este lavado no controlado disuelve el grano diluyéndolo en la miel que es separada, ocasionando pérdidas considerables.

A través de este estudio, realizado en el Ingenio Trinidad, ubicado en el departamento de Escuintla, Guatemala, se comprueba que en el intervalo de tiempo de $t = 15$ s a $t = 25$ s del lavado de la capa de azúcar, es cuando más azúcar se deja de envasar y por ende se obtiene más miel recirculada, lo que impacta económicamente en cualquier empresa productora de azúcar, estableciéndose que, en cada lote se pierde en promedio 26.36 Q/Kg. Así también se evidencia la subutilización del equipo e insumos mientras más se lava el azúcar. Por lo que, se recomienda optimizar este proceso de fabricación a través de la investigación y mejora continua, paralelo a un análisis de costo/beneficio, involucrando a la alta gerencia del Ingenio Trinidad.

1. GENERALIDADES DE LA SACAROSA

Se considera que la caña puede ser originaria del archipiélago de Melanesia, en Nueva Güinea. Llevándose después a otros países, hasta llegar a las Islas Canarias. Al primer país americano al que llegó fue la República Dominicana.

1.1 Definición

Este es el azúcar comercial, sus fuentes principales son: la caña de azúcar y la remolacha azucarera. Su fórmula es $C_{12}H_{22}O_{11}$. Entre sus propiedades físicas más importantes están:

1.2 Propiedades físicas

Dentro de las principales propiedades físicas de la sacarosa se tienen:

1.2.1 Solubilidad

La sacarosa es muy soluble en agua, y dicha solubilidad aumenta con la temperatura. Muchos investigadores han determinado los valores de solubilidad de la sacarosa en soluciones puras saturadas. Las cifras obtenidas por Herzfeld en 1892 son las mejores conocidas y las más usadas. Herzfeld determinó experimentalmente la solubilidad de la sacarosa en agua pura saturada a seis temperaturas diferentes. La siguiente ecuación de una curva atenuada se obtuvo a partir de esos resultados experimentales y expresa los valores de solubilidad de la tabla de Herzfeld desde 0 a 373 k.

$$C = 64.18 + 13.48T + 0.000531T^2$$

Donde:

C = % de sacarosa en solución saturada.

T = temperatura en °C.

La solubilidad de la sacarosa pura se expresa frecuentemente como el porcentaje de sólidos disueltos en peso; pero para propósitos de comparación de la solubilidad, es preferible la relación de sacarosa a agua. Esta relación, generalmente significa partes de sacarosa por 100 partes de agua y se le conoce como número de solubilidad. Las ecuaciones siguientes permiten transformar una forma en otra, donde:

X = sacarosa por 100 de agua

Y = porcentaje de sacarosa en peso

$$Y = (100 X)/(100 + X)$$

$$X = (100Y)/(100-Y)$$

1.2.2 Efecto de la temperatura en la viscosidad

La temperatura tiene mucho efecto en la viscosidad, la que disminuye rápidamente con el aumento de temperatura.

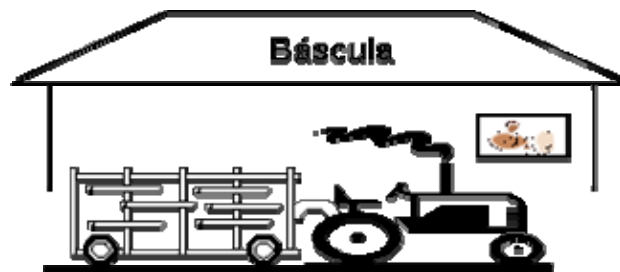
2. PROCESO PARA LA ELABORACIÓN DEL AZÚCAR CRUDO DEL INGENIO TRINIDAD

Los diferentes pasos que se dan para la obtención de azúcar granular en el Ingenio Trinidad, a partir de la caña de azúcar, y se describe a continuación.

2.1 Pesaje de la caña

En el Ingenio Trinidad la caña se pesa por lo general, en grandes básculas de plataforma junto con la unidad de transporte (camiones, remolques y carretas). Dependiendo del tipo de transporte, la caña puede ser transportada a granel, maleteada y trameada (ver figura 1).

Figura 1. Báscula para pesar la caña de azúcar

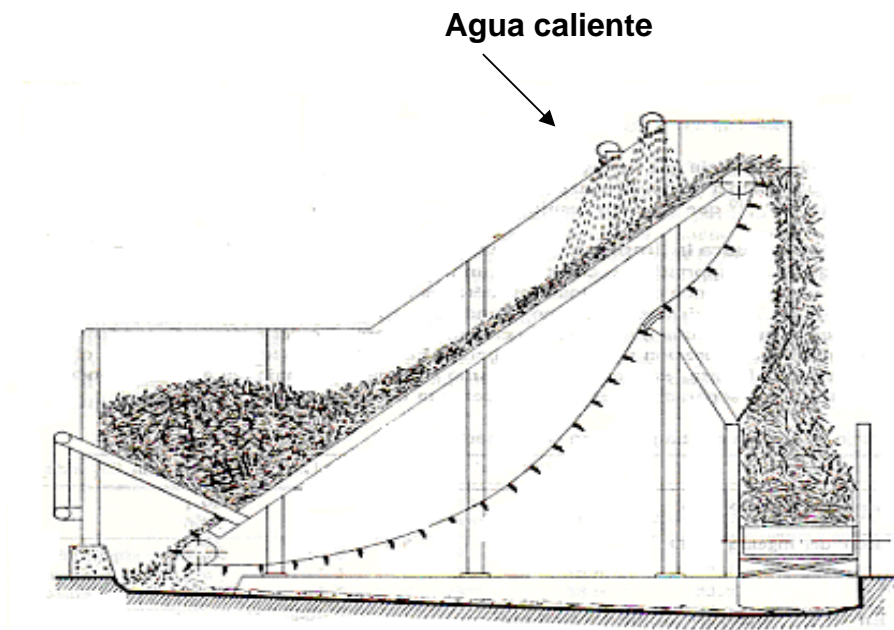


Fuente: Ingenio Trinidad

2.2 Lavado de la caña

Debido a la mecanización del corte y alce de la caña en los campos, la cantidad de materia extraña e impurezas indeseables ha aumentado, por lo que se ha hecho necesario el lavado de la misma para eliminarlas, siendo las que en mayor cantidad se encuentran: tierra y arena. El agua que se utiliza para este lavado, proviene de la cola de los condensadores de los tachos y evaporadores (ver figura 2).

Figura 2. Mesa de lavado de la caña de azúcar



Fuente: Manual del azúcar de caña. Chen, James C.P.

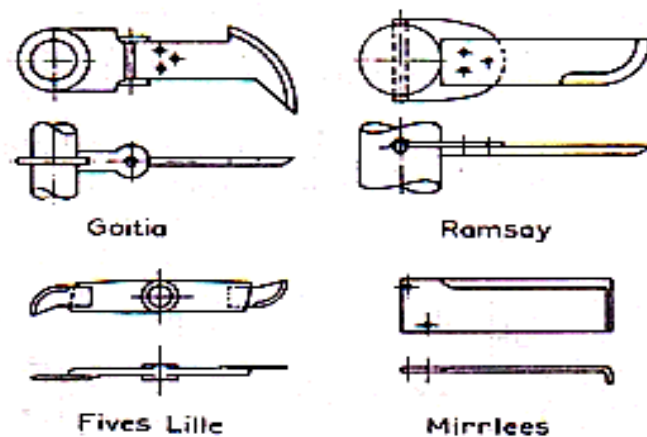
2.3 Preparación de la caña

Antes de ingresar la caña a la etapa de molienda, se somete a un proceso de preparación, que tiene como finalidad abrir la fibra para facilitar la extracción de la sacarosa. Existen diversas maneras de lograrlo, entre las más comunes están:

2.3.1 Mediante cuchillas giratorias

Que cortan la caña en trozos pero no extraen el jugo (ver figura 3).

Figura 3. Cuchillas giratorias para preparación de la caña de azúcar

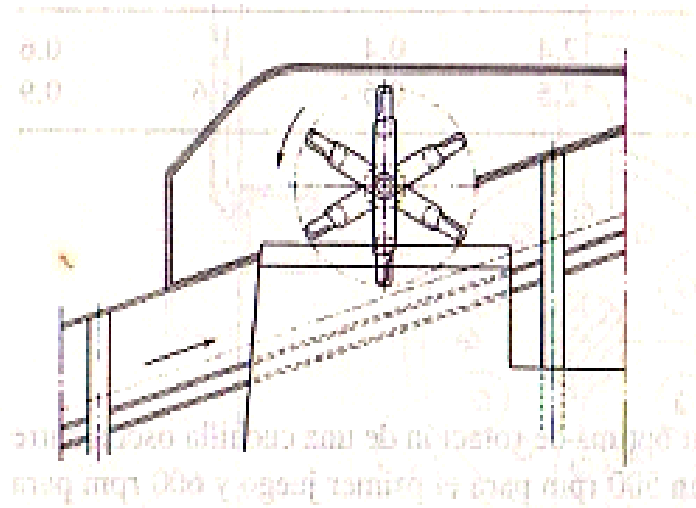


Fuente: Manual de ingenieros azucareros. Hugot, E.

2.3.2 Desfibradora

Que reducen la caña a tiras, sin extraer el jugo (ver figura 4).

Figura 4. Desfibradora de la caña de azúcar



Fuente: Manual de ingenieros azucareros. Hugot, E.

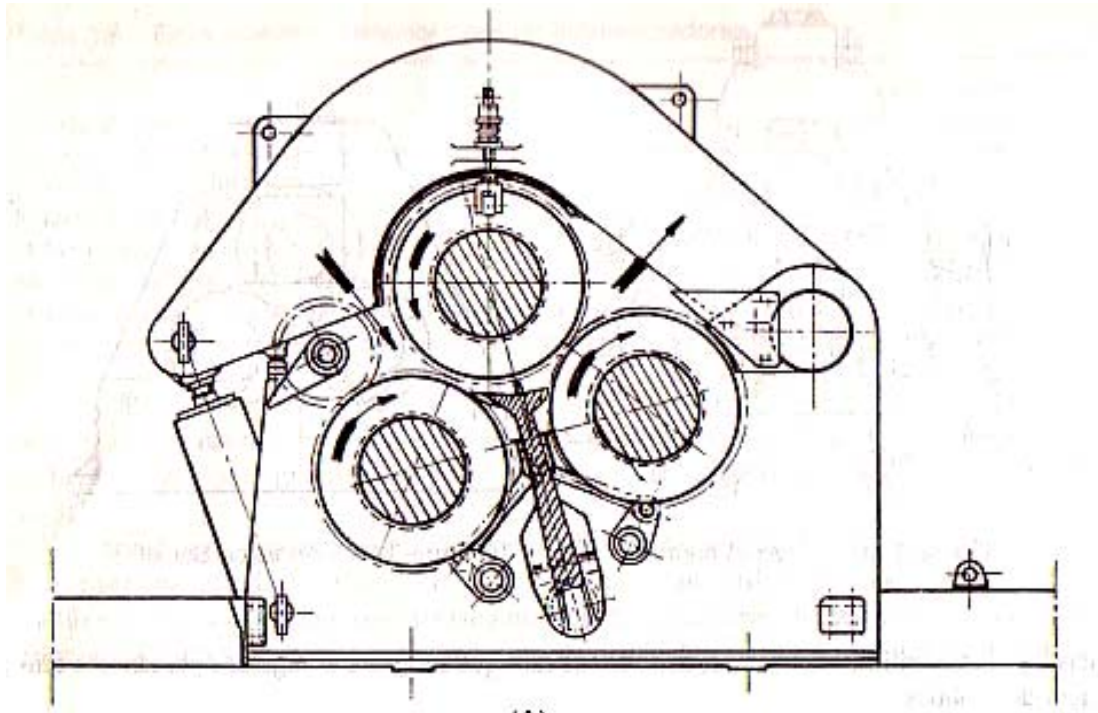
2.3.3 Desmenuzadoras

Que quiebran y aplastan la caña y extraen el jugo.

2.4 Molienda

La combinación clásica de tres rodillos o mazas dispuestos en forma triangular, es una unidad estándar de molienda. Se utilizan de tres a siete juegos de dichas unidades, llamadas respectivamente molinos. Los rodillos tienen de 0.609 m a 0.914 m de diámetro y de 1.219 m de largo, aunque puede haber más grandes. Cada unidad es movida por una unidad motriz individual que puede ser una máquina de vapor, motor eléctrico, o una turbina de vapor (ver figura 5).

Figura 5. Molino de tres rodillos

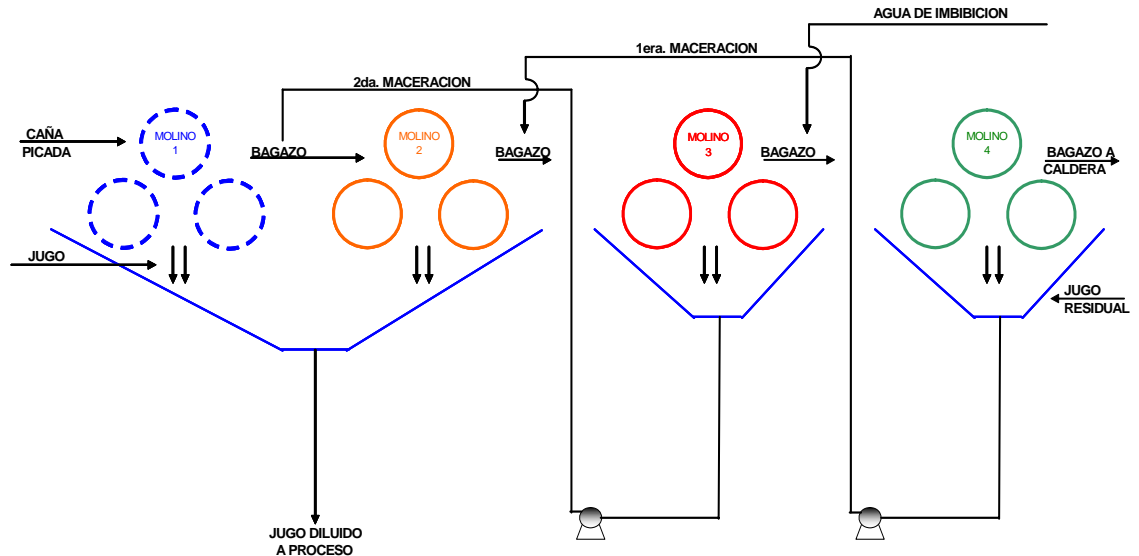


Fuente: Manual de ingenieros azucareros. Hugot, E.

2.5 Extracción del jugo

Con el equipo que se describió anteriormente se le extrae el jugo a la caña, la extracción se realiza haciendo pasar el colchón de caña ya preparado a través de los molinos, extrayéndole la mayor cantidad de sacarosa posible. Al bagazo que sale de cada molino se le añade agua o jugo, para aumentar la extracción. Este uso del agua se conoce como maceración o imbibición. La maceración y la imbibición puede compararse con enjuagar y exprimir repetidas veces la caña (ver figura 6).

Figura 6. Estación de cuatro molinos



Fuente: Ingenio Trinidad

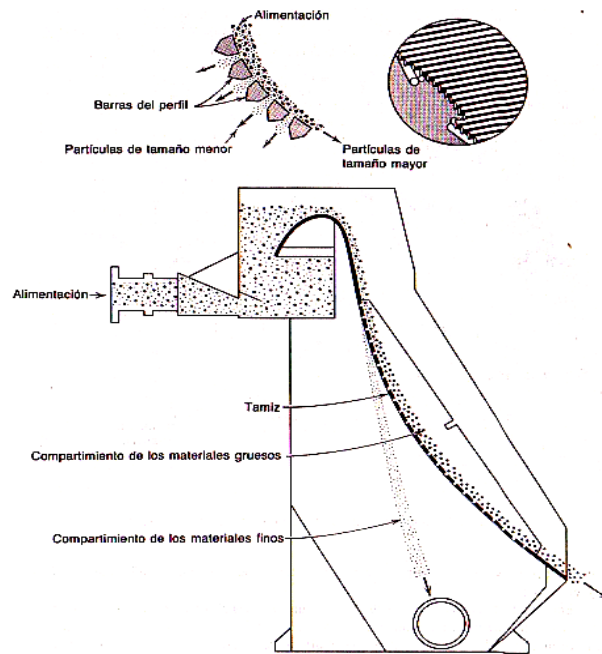
2.6 Colado del jugo

El jugo proveniente de los molinos contiene partículas finas de bagazo (bagacillo), y de tierra que tienen que eliminarse, antes de que el jugo pase al proceso de fabricación. El tipo de colador más común es el de tamices estacionarios, cuya superficie se mantiene limpia mediante el uso de raspadores, también hay coladores rotativos o DSM. Los coladores están siendo sustituidos por el uso de bomba inatascables (ver figura 7).

2.6.1 Bagazo

Es un subproducto o residuo de la molienda y se utiliza como combustible en las calderas para la generación de vapor, debiendo llenar requisitos de humedad que hagan posible poder quemarlo.

Figura 7. Colador DSM

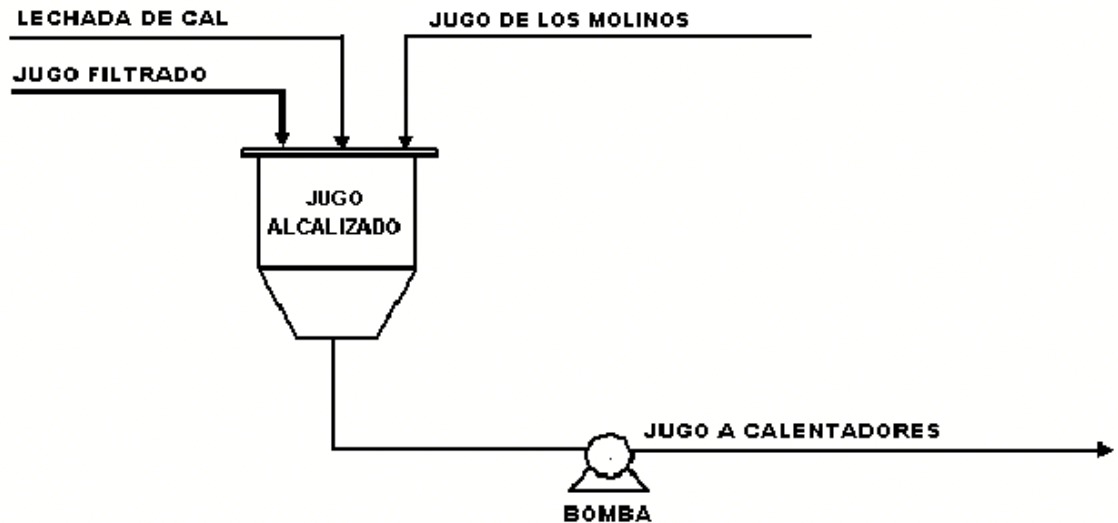


Fuente: Manual del azúcar de caña. Chen, James C.P.

2.7 Alcalización

El jugo proveniente de los molinos es de color verde oscuro, es ácido y turbio, el jugo tiene un pH bajo por lo que para estabilizarlo se emplea en forma universal la lechada de cal, alrededor de 0.0005016 Kg de CaO por kilogramo de caña. La cal neutraliza la acidez natural del guarapo, formando sales insolubles de calcio y magnesio con el fin de formar precipitados que se decantan en la etapa de clarificación. La alcalización puede hacerse en frío o en caliente. La cal se agrega previamente preparada a 18 ° Brix (ver figura 8).

Figura 8. Estación de alcalización

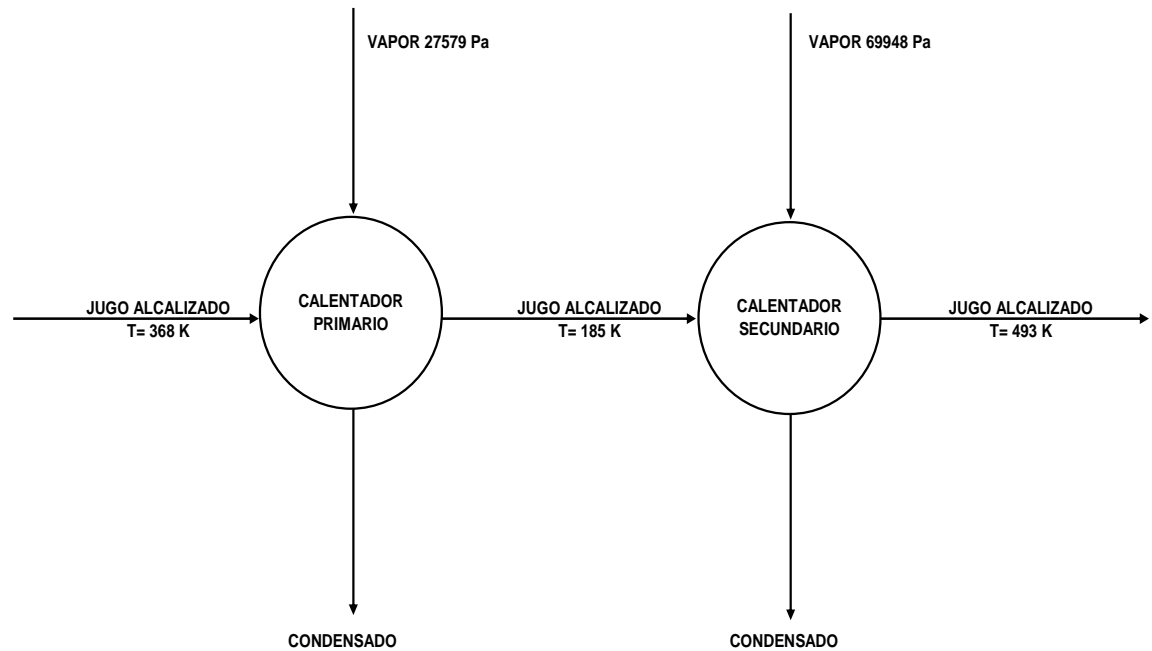


Fuente: Ingenio Trinidad

2.8 Calentamiento

El calentamiento del jugo alcalizado hasta el punto de ebullición o ligeramente arriba, coagula algunas grasas y ceras que son las que precipitan formando un lodo. El calentamiento puede hacerse en 2 ó 3 etapas, el más común es de 2 etapas que utilizan vapor de 27,579 Pa para elevar la temperatura del jugo de 368 K a 458 K (calentamiento primario), y vapor de 68,948 Pa para elevar la temperatura del jugo de 458 k a 493 K (calentamiento secundario o rectificador), este calentamiento se realiza generalmente, utilizando calentadores de concha y tubo de varios pases. Actualmente se empiezan a usar para este fin los calentadores de placas (ver figura 9).

Figura 9. Estación de calentamiento

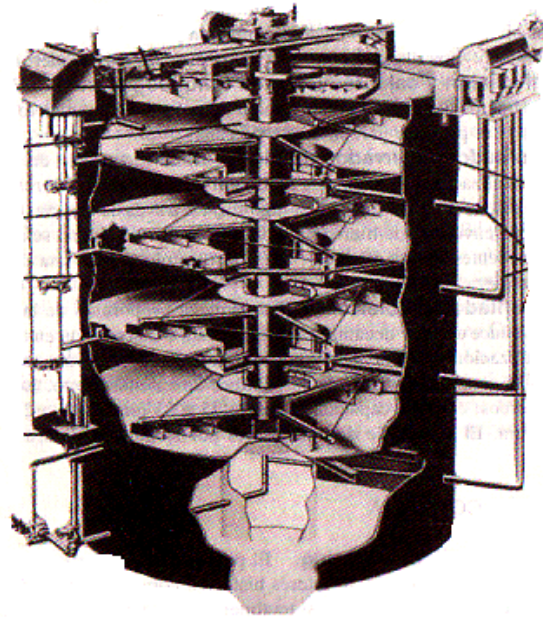


Fuente: Ingenio Trinidad

2.9 Clarificación

Esta etapa es muy importante, especialmente cuando se está fabricando azúcar blanco y consiste en dejar reposar el jugo un tiempo mínimo de dos horas, para que los productos formados en la alcalización y calentamiento decanten, obteniendo un jugo completamente limpio y claro. El clarificador utilizado en la industria azucarera, es el *rapi dorr* 444 (ver figura 10).

Figura 10. Clarificador *rapi dorr* 444

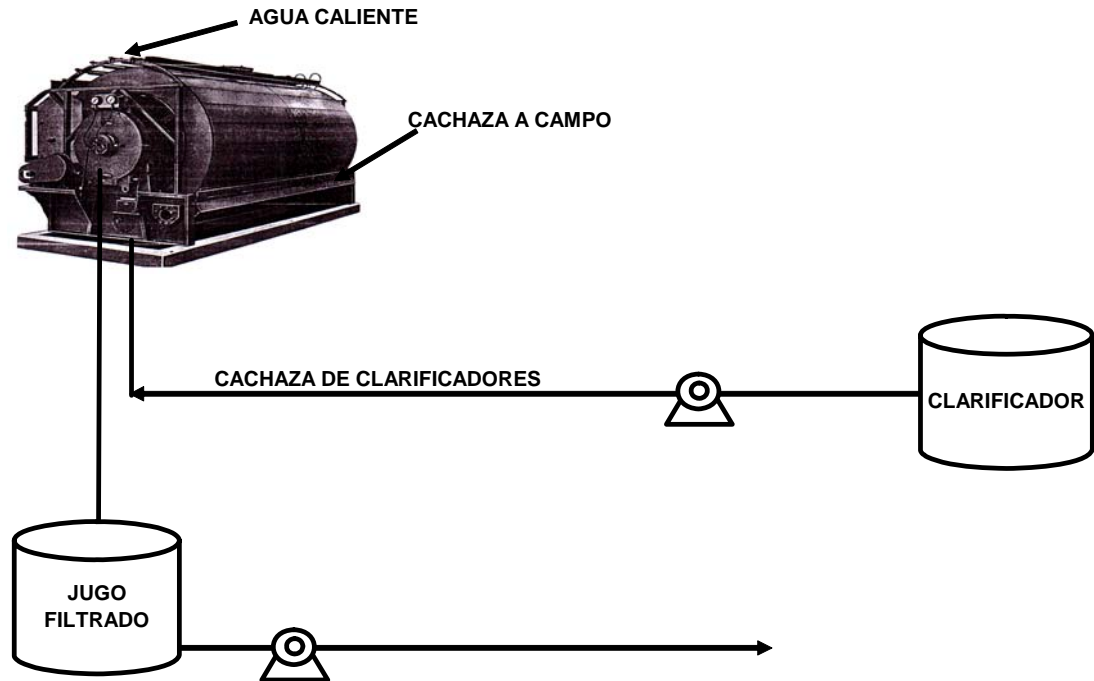


Fuente: Manual del azúcar de caña. Chen, James C.P.

2.10 Filtración

Los lodos formados en el clarificador reciben el nombre de cachaza y son retirados continuamente por medio de un sistema de bombas de diafragma, como éste lodo arrastra sacarosa en aproximadamente 10%, se hacen pasar por filtros rotativos al vacío, en los cuales se recupera la misma (ver figura 11).

Figura 11. Estación de filtración

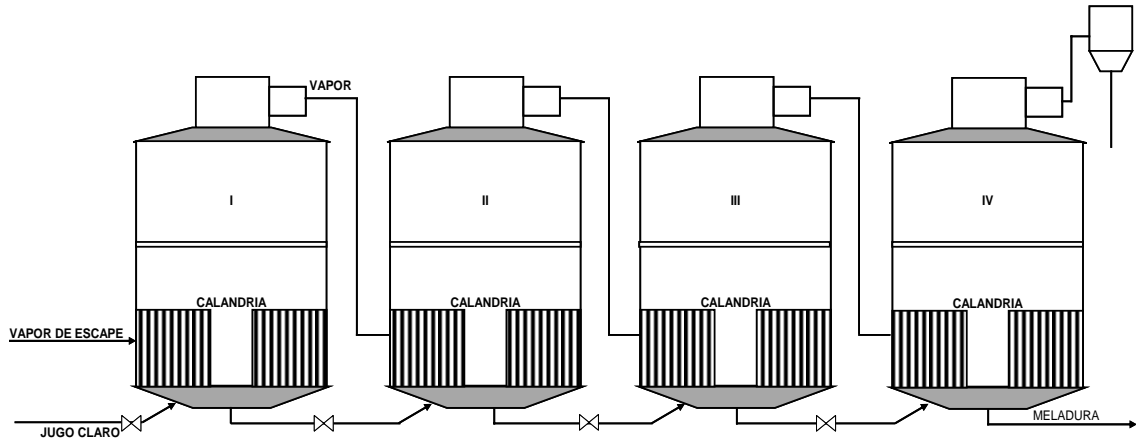


Fuente: Ingenio Trinidad.

2.11 Evaporación

El jugo clarificado contiene aproximadamente 75% de agua. Ésta se elimina por medio de evaporadores de múltiple efecto, un múltiple efecto consiste en una serie de vasos o cuerpos ordenados de tal manera que cada cuerpo subsiguiente tiene un vacío más alto, lo que hace que el líquido hierva a una temperatura más baja; los vapores de un cuerpo hacen hervir el jugo del siguiente y el vapor del último pasan a un condensador. Así, de esta manera el jugo que ingresó al primer cuerpo de la evaporación a 15° *Brix*, sale del último ya en forma de jarabe al cual se le llama meladura con 62° *Brix* (ver figura 12).

Figura 12. Estación de evaporación en cuádruple efecto



Fuente: Ingenio Trinidad.

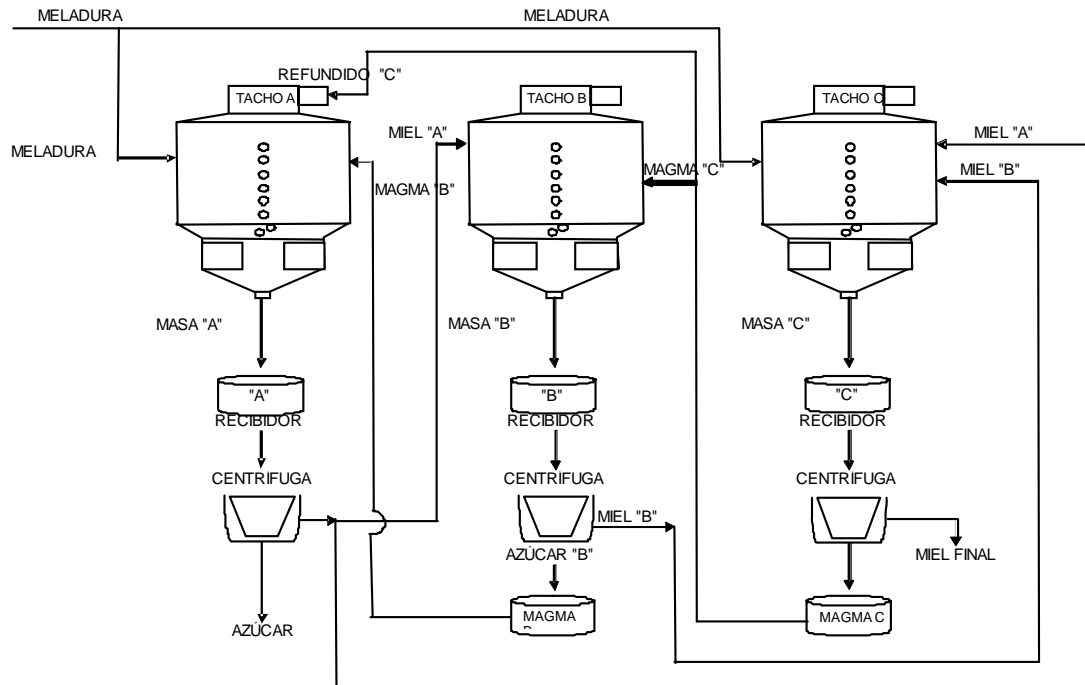
2.12 Cristalización

Esta es la etapa donde se forman los cristales de azúcar, se utilizan tachos al vacío, donde la meladura se sigue evaporando hasta saturarse, momento en el cual se añaden semillas que sirven de núcleo para la formación de cristales, formados los cristales se sigue agregando meladura para que éstos crezcan y llenen el tacho, al contenido de un tacho lleno se le da el nombre de templa y al material masa cocida (ver figura 13).

2.13 Centrifugación

Los cristales de la masa cocida, tienen un revestimiento de miel que se elimina mediante el uso de centrifugas. En esta etapa se da la separación del azúcar y las mieles, las cuales sufren un proceso de recristalización logrando con esta el máximo agotamiento y por consiguiente, la recuperación del azúcar contenida en las mismas.

Figura 13. Estación de cristalización para tres masas cocidas



Fuente: Manual del azúcar de caña. Chen, James C.P.

2.14 Secado

El azúcar, se seca para obtener un producto con características de humedad adecuadas y que son necesarias para su conservación, ya sea en sacos o silos. El azúcar al salir de las centrifugas sale con aproximadamente 1% de humedad y al pasar por la secadora esta baja a 0.1%.

2.15 Almacenamiento

Para el almacenamiento de él azúcar crudo generalmente se utiliza bodegas de granel y es llevada a esta bodega por medio de un sistema de conductores de faja o banda. En algunos lugares se utilizan sacos de polipropileno para almacenamiento, aunque este uso es más exclusivo para el caso de él azúcar blanco.

3. CENTRÍFUGAS

3.1 Función

Una vez que la masa cocida haya sido agotada y concentrada en los tachos o en los cristalizadores, hay que proceder a separar los cristales de él azúcar del licor madre o miel. Para hacer esta separación, se utilizan las centrífugas.

Al iniciarse el movimiento de la centrífuga, la carga se añade inmediatamente abriendo la compuerta del mezclador y la masa cocida se levanta dentro de la canasta debido a la fuerza centrífuga generada por la rotación de la misma. De este modo la masa cocida se distribuye sobre el revestimiento perforado, las mieles son despedidas hacia la envolvente y los cristales son retenidos. La centrífuga continúa hasta que los cristales de azúcar quedan lo más posible libres de mieles, después de lo cual los cristales pueden continuar siendo purgados mediante el rociado de agua.

Además del llenado, purgado y lavado, el ciclo incluye la descarga del azúcar, que se hace levantando la válvula de descarga ubicada en el fondo de la centrífuga. Enseguida, el descargador neumático baja mientras la canasta gira lentamente y el azúcar cae en un transportador. El lavado no siempre se aplica en la fabricación de azúcar crudo, pero en la producción de azúcares blanco es esencial.

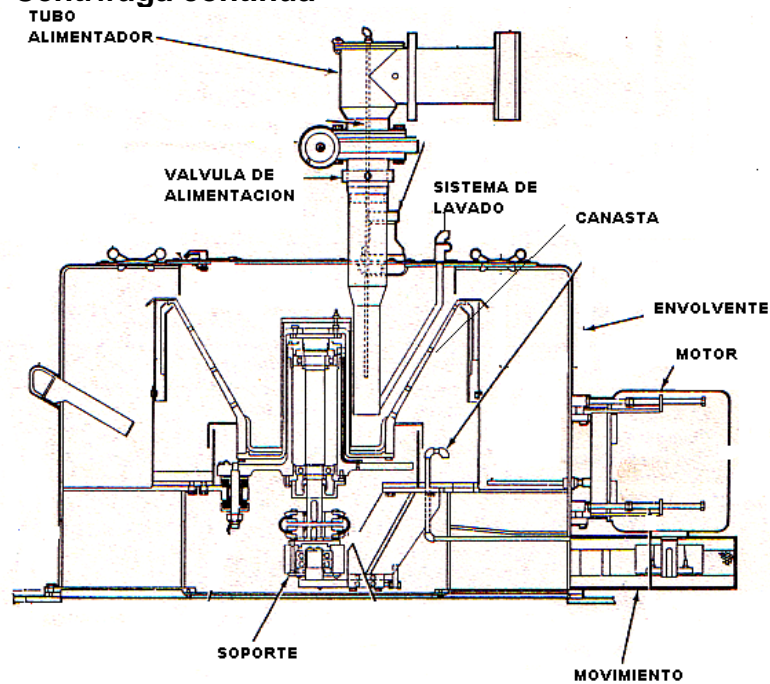
3.2 Tipos

En la práctica moderna se utilizan dos tipos de centrífugas: las continuas y las discontinuas o tipo lote.

3.2.1 Centrífugas continuas

En estas la descarga de la miel y del azúcar, se efectúa constantemente y sin interrupción. El empleo de éstas centrífugas, es desde todo punto de vista ventajoso, debido a sus bajos costos de mantenimiento, de consumo energético y de precio, su uso se ha generalizado en la purga de las masas B y C (Ver figura 14).

Figura 14. Centrífuga continua



Fuente: Manual del azúcar de caña. Chen, James C.P.

3.2.1.1 Partes de una centrifuga continua

Las centrifugas continuas constan de las siguientes partes:

3.2.1.1.1 Envolvente

Es la parte exterior de la centrífuga, contiene el azúcar purgado y lo dirige al conductor de azúcar por medio de dos conos bipartidos.

3.2.1.1.2 Canasto

Es cónico, variando el ángulo de 25° a 34° siendo 30° el estándar normal, es de acero inoxidable y perforado para darle salida a la miel.

3.2.1.1.3 Telas y contratelas

La contrátela es fuerte, bien abierta, de acero inoxidable y va soldada al canasto. Las telas son dos o tres, según el tamaño de la centrífuga y se fijan al canasto mordiéndolas por presión a la copa o taza, van atornilladas al cabezal del movimiento y sujetadas por tres retenedores. Las telas son de acero inoxidable de 0.2 a 0.27 mm. de espesor con agujeros cónicos de 0.06 mm.

3.2.1.1.4 Tubo alimentador

Este esta provisto de una válvula reguladora que lleva la masa cocida al centro del soporte, que sirve a su vez de cono invertido para llevar la masa al fondo y regresarla hacia arriba por la tela, la masa baja formando un chorro ligeramente cónico, que es lubricando con agua por una varilla interior con pequeñas perforaciones y un sistema de lavado coaxial exterior que puede ser solamente con agua o agua y vapor.

3.2.1.1.5 Sistema de lavado

Se realiza con agua y vapor, por medio de dos tubos perforados paralelos al canasto.

3.2.1.1.6 Compartimiento de mieles

Recolecta la miel purgada y la deposita en un tanque.

3.2.1.1.7 Soporte

Este va conectado al motor por una suspensión de amortiguadores de hule, un eje y una polea, también esta conectado al tazón de carga y al canasto.

3.2.1.1.8 Movimiento

Está formado por dos poleas, una en el eje de la centrífuga y otra en el eje del motor eléctrico, unidas por fajas V.

3.2.1.2 Capacidad de las centrifugas continuas

A continuación se presenta una tabla con los tamaños y capacidades de las centrifugas continuas:

Tabla I. Centrifugas continuas

Tamaño	Capacidad (masa cocida m ³ /s.)
34° x 0.86m	0.00031-0.00094
30° x 0.94m	0.00086-0.0017
30° x 1.02m	0.0017-0.0026
° = ángulo del canasto m = diámetro del canasto	

Fuente: *wester states machine company*

Cálculo de una estación de centrifugas continuas para purgar masa cocida B de 94° Brix, usando centrifugas de 30° x 1.02 m, considerando una producción de 0.065 m³ por cada 907.18 Kg de caña.

Caña molida = 47.25 Kg/s

Masa cocida B producida = 0.0034 m³/s

Tomando la máxima capacidad = 0.0026 m³/s

Tenemos:

$0.0034 \text{ m}^3/\text{s} / 0.0026 \text{ m}^3/\text{s} = 1.31 \text{ máquinas}$

Se necesitan 2 centrifugas continuas para masa B de 30° x 1.02 m

Cálculo de una estación de centrifugas para masa C de 98 °Brix, usando centrifugas 30° x 1.02 m considerando una producción de 0.028 m³ por cada 907.18 Kg de caña.

Caña molida = 47.25 Kg/s

Masa cocida C producida = 0.0017 m³/s

Tomando la máxima capacidad = 0.0026 m³/s

Tenemos:

$0.0017 \text{ m}^3/\text{s} / 0.0026 \text{ m}^3/\text{s} = 0.66 \text{ máquinas}$

Se necesita 1 centrífuga 30° x 1.02 m

3.2.2 Centrífugas discontinuas o por lote

Estas centrifugas pueden ser automáticas o semiautomáticas, aunque predominan las que se operan automáticamente (ver figura 15).

3.2.2.1 Partes

Las partes más importantes y principales de estas centrifugas son:

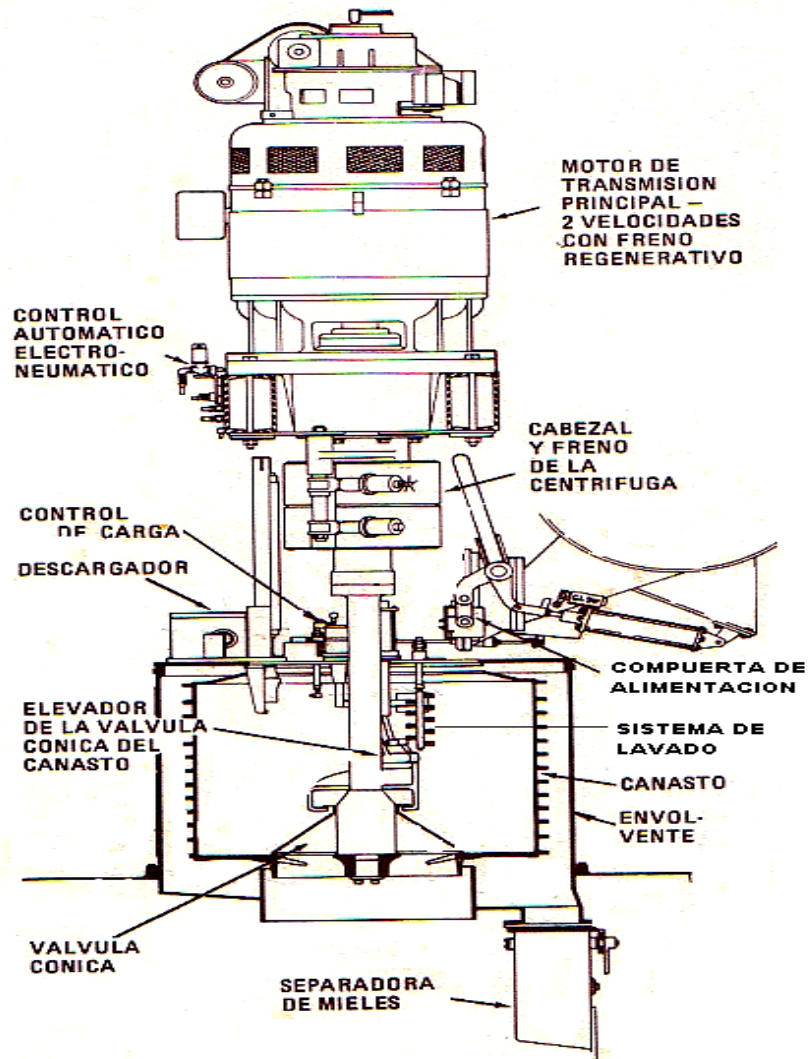
3.2.2.1.1 Compuerta de alimentación

Ésta permite la entrada de la masa cocida que se encuentra en el mezclador al interior de la centrifuga.

3.2.2.1.2 Canasto

Es cilíndrico y perforado gira sujeto al eje o flecha en el fondo del canasto.

Figura 15. Centrífuga discontinua o por lote



Fuente: *wester states machine company*

3.2.2.1.3 Telas y contrátelas

El canasto esta recubierto con una malla de sostén de alambre # 8 o dos de # 5 y # 8 (él # es el número de agujeros por metro cuadrado), llamadas contrátelas y por la tela perforada de cobre con perforaciones de 4 mm de largo x 0.3 mm a 0.7 mm de ancho.

3.2.2.1.4 Sistema de lavado

Dentro del canasto está el *Manifold* del lavado que contiene varios rociadores o atomizadores, son de 5 a 9 dependiendo del tamaño de la máquina, estos lavan de forma pareja con agua caliente la masa cocida.

3.2.2.1.5 Envolvente

Es concéntrica al canasto por una brida con radios, que es por donde sale el azúcar hacia el conductor.

3.2.2.1.6 Cabezal

Este es el que acopla el eje del motor y el eje del canasto, contiene los cojinetes que los soportan, un amortiguador de hule evita la vibración y estabiliza la máquina.

3.2.2.1.7 Freno y motor

El freno puede ser de zapatas radiales o de discos y el motor de velocidad variable o de dos o tres velocidades.

3.2.2.1.8 Temporizadores y controles

Los temporizadores son lo que controlan los tiempos de: lavado de la tela y masa cocida, carga y descarga, purga, separación de mieles, entre lavados, secado, aplicación del freno regenerativo, parada y puesta en marcha atrás y arranque automático.

Los controles automáticos generalmente están instalados en un panel electrónico *solid state* con controles electrónicos, transformadores y equipos para variar la velocidad gradualmente.

3.3 Capacidad de las centrifugas automáticas

A continuación se presenta una tabla con los tamaños y capacidades de las centrifugas automáticas.

Tabla II. Capacidad de las centrifugas automáticas

Tamaño de la canasta DxExH	capacidades		velocidad rpm	capacidad teórica	
	Kg	m ³		m ³ /s	Kg/s
1.02 x 0.76 x 0.15	480	0.32	1150	0.0016	2.5
1.02 x 0.76 x 0.15	480	0.32	1450	0.0019	2.8
1.22 x 0.76 x 0.18	675	0.44	960	0.0021	3.4
1.22 x 0.76 x 0.18	675	0.44	1160	0.0025	3.9
1.22 x 0.76 x 0.18	675	0.44	1450	0.0027	4.2
1.22 x 0.76 x 0.18	810	0.53	960	0.0025	3.9
1.22 x 0.76 x 0.18	810	0.53	1160	0.0029	4.5
1.37 x 1.02 x 0.18	1030	0.68	860	0.0029	4.5
1.37 x 1.02 x 0.18	1030	0.68	960	0.0031	4.8
1.37 x 1.02 x 0.18	1030	0.68	1050	0.0035	5.3
1.37 x 1.02 x 0.18	1030	0.68	1160	0.0037	5.6

Fuente: *wester states machine company*

D = diámetro de la canasta en metros
 E = altura de la canasta en metros
 H = Grosor de la canasta en metros

3.4 Tiempos de las operaciones de una centrífuga por lote

Los tiempos de duración del ciclo de trabajo para una centrífuga por lote varían de acuerdo a la calidad de azúcar que se está produciendo, los tiempos experimentales para el azúcar crudo y blanco se muestra en la tabla III.

Tabla III. Tiempo en segundos de las operaciones de una centrífuga por lote y ciclo total para azúcar blanco y crudo

Operación	Tiempo (s)	
	Azúcar crudo	Azúcar blanco
Limpieza tela	5	5
Carga	10	10
Romper purga	5	10
Primer lavado	1	7
Entre lavado	5	15
Segunda lavado	1	8
Secado	60	70
Parar	15	15
Descarga	50	50
Ciclo total	152	190

Fuente: Ingenio Trinidad.

Cálculo de una estación de centrífugas por lote para purgar masa cocida A de 92° Brix, usando centrífugas de 1.22 m x 0.76 m, considerando una producción de masa cocida A de 0.15 m³ de masa cocida A por cada 907.18 Kg de caña, tenemos entonces:

$$\text{Caña molida} = 47.25 \text{ Kg/s}$$

$$\text{Masa cocida producida} = (47.25 \text{ Kg/s} \times 0.15 \text{ m}^3) / 907.18 \text{ Kg} = 0.0078 \text{ m}^3 / \text{s}$$

Tomando una producción de 0.43 m³/ciclo para una centrífuga de 1.22 m x 0.76 m y considerando 22 horas de trabajo para la máquina ya que a diario hay que hacerle ajustes.

Entonces se tiene:

$$0.0055 \text{ ciclos/s} \times 22 \text{ hr} / 24 \text{ hr} = 0.0050 \text{ ciclos/s}$$

$$0.0050 \text{ ciclos/s} \times 0.43 \text{ m}^3 / \text{ciclo} = 0.0022 \text{ m}^3 / \text{s}$$

$$\text{No. de centrífugas necesarias} = 0.0078 \text{ m}^3 / \text{s} / 0.0022 \text{ m}^3 / \text{s} = 3.5 \text{ máquinas}$$

Se necesitan = 4 centrífugas de 1.22m x 0.76m.

4. PROCESO PARA DETERMINAR LA PERDIDA DE AZÚCAR POR EXCESO DE LAVADO EN EL INGENIO TRINIDAD

4.1 Metodología

Este estudio se realizó en el Ingenio Trinidad, productor de azúcar crudo, se analizó durante 9 días, la masa cocida de dos tachos cuyos volúmenes de operación son: Tacho No 1. 22.65 m³ y Tacho No 2. 28.32 m³. La masa cocida de estos dos tachos se depositó en dos recibidores tipo U de 22.65 m³ cada uno, los cuales descargaron a un mezclador de 28.32 m³ ubicado sobre la batería de 6 centrifugas y que alimentó de carga a la centrifuga de prueba. Se tomó una muestra de la masa cocida de cada tacho descargado y en el laboratorio se hicieron los análisis y la determinación del *brix* y *pol* de cada muestra. Con estos datos se calculó la pureza de cada masa.

De la batería de 6 centrifugas se independizó la descarga de una centrifuga marca *Western States* 1.22 m x 0.76 m – 1200 rpm , accionada por un motor eléctrico de 56000 w. La masa cocida se cargó en la canasta , por medio de una compuerta que es accionada neumáticamente, cuando la carga se completó, empezó a girar y debido a la fuerza centrífuga del movimiento la capa de masa se pegó a la pared de la canasta, la cual está equipada con un *set* de telas de diferentes diámetros de perforación, cuya función es retener el grano de azúcar y dejar pasar a través de las perforaciones la miel.

Cuando la canasta se encontraba girando, se le adicionó a la capa de masa el agua de lavado. Al concluir el tiempo total del ciclo de operación de la centrifuga, automáticamente el azúcar se descargó a un gusano sin fin.

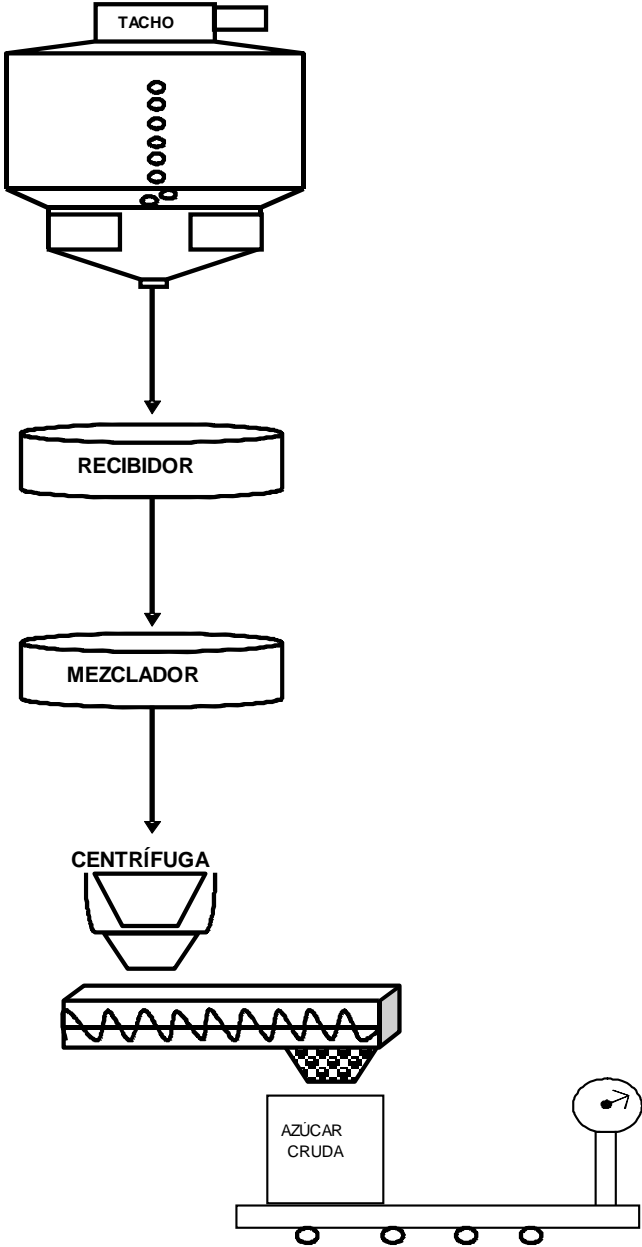
En uno de los extremos de este gusano, se instaló un cono que se utilizó para descargar el azúcar a los sacos de polipropileno de 50 Kg., los cuales se pesaron uno por uno en una báscula de plataforma marca Toledo con capacidad de 150 Kg. Para cada tiempo de lavado se determinó el peso del azúcar descargada.

El agua que se empleó para lavar el azúcar, es agua condensada proveniente de la condensación de los vapores del tercer y cuarto efecto del sistema de evaporación de jugo. El agua se recolectó en un tanque con una capacidad de 1 m³. La temperatura del agua es de 338.71-344.26 K. El agua se llevó a la centrífuga, utilizando una bomba tipo centrífuga de 0.019 m³/s y una presión de descarga de 4,788 Pa. El agua se aplicó a la capa de azúcar utilizando un ramillete de 7 boquillas de bronce, las cuales se ubicaron siguiendo instrucciones del manual de la máquina. Las boquillas tienen un orificio de 0.00158 m de diámetro y una capacidad de 0.00028 m³/s.

El flujo de agua a la centrífuga se controló utilizando una electroválvula del tipo solenoide de 0.0254 m de diámetro, la cual se controló utilizando un temporizador digital, cuya escala es de 0 a 60 segundos, con una variación de 0.5 segundos. El lavado se hizo en dos partes dejando entre cada lavado un tiempo de 10 segundos, necesario para que la miel que recubre el grano de azúcar purgue. Para cada tiempo de lavado se tomó una muestra de miel y en el laboratorio se hicieron los respectivos análisis y determinaciones de los valores de: *Brix* y *Pol*, con los cuales se calculó la pureza de la miel.

El análisis de *brix* se realizó empleando un refractómetro *Schmidt + Haensch ATR-E* y para los análisis de *pol* se utilizó un polarímetro *Rudolph Autopol 880* (ver figura 16).

Figura 16. Diagrama de flujo de las pruebas



Fuente: Ingenio Trinidad.

Tabla IV. Prueba No. 1

28.32 m ³ de masa cocida "A" de 91.8° Brix. Tacho No.2					
Tiempo (s)	Peso azúcar descargada (Kg)	Diferencia de peso respecto a t = 5 s.	%	Diferencia de peso respecto al tiempo anterior (Kg).	%
5	520.75			0	
10	500.25	20.50	3.94	20.50	3.94
15	476.76	43.98	8.45	23.48	4.51
20	469.89	50.86	9.77	6.88	1.32
25	467.94	52.81	10.14	1.95	0.37

Tabla V. Prueba No. 2

28.32 m ³ de masa cocida "A" de 91.6° Brix. Tacho No.2					
Tiempo (s)	Peso azúcar descargada (Kg)	Diferencia de peso respecto a t = 5 s.	%	Diferencia de peso respecto al tiempo anterior (Kg).	%
5	518.20			0	
10	496.39	21.81	4.21	21.81	4.21
15	475.17	43.03	8.30	21.22	4.10
20	467.75	50.45	9.74	7.42	1.43
25	466.03	52.17	10.07	1.72	0.33

Tabla VI. Prueba No. 3

28.32 m ³ de masa cocida "A" de 91.6° Brix. Tacho No.2					
Tiempo (s)	Peso azúcar descargada (Kg)	Diferencia de peso respecto a t = 5 s.	%	Diferencia de peso respecto al tiempo anterior (Kg).	%
5	497.90			0.00	
10	476.86	21.04	4.23	21.04	4.23
15	454.19	43.71	8.78	22.67	4.55
20	446.59	51.31	10.31	7.60	1.53
25	445.37	52.53	10.55	1.22	0.25

Tabla VII. Prueba No. 4

28.32 m ³ de masa cocida "A" de 92° Brix. Tacho No.2					
Tiempo (s)	Peso azúcar descargada (Kg)	Diferencia de peso respecto a t = 5 s.	%	Diferencia de peso respecto al tiempo anterior (Kg).	%
5	486.53			0	
10	464.40	22.13	4.55	22.13	4.55
15	444.86	41.67	8.57	19.55	4.02
20	436.62	49.91	10.26	8.24	1.69
25	435.40	51.13	10.51	1.22	0.25

Tabla VIII. Prueba No. 5

28.32 m ³ de masa cocida "A" de 91° Brix. Tacho No.2					
Tiempo (s)	Peso azúcar descargada (Kg)	Diferencia de peso respecto a t = 5 s.	%	Diferencia de peso respecto al tiempo anterior (Kg).	%
5	479.96			0	
10	465.56	14.41	3.00	14.41	3.00
15	442.75	37.21	7.75	22.81	4.75
20	436.15	43.81	9.13	6.60	1.38
25	435.23	44.74	9.32	0.92	0.19

Tabla IX. Prueba No. 6

28.32 m ³ de masa cocida "A" de 92° Brix. Tacho No.2					
Tiempo (s)	Peso azúcar descargada (Kg)	Diferencia de peso respecto a t = 5 s.	%	Diferencia de peso respecto al tiempo anterior (Kg).	%
5	503.31			0	
10	481.91	21.40	4.25	21.40	4.25
15	460.01	43.30	8.60	21.90	4.35
20	452.54	50.77	10.09	7.47	1.48
25	451.91	51.40	10.21	0.63	0.13

Tabla X. Prueba No. 7

28.32 m³ de masa cocida "A" de 92° Brix.					
Tacho No.1					
Tiempo (s)	Peso azúcar descargada (Kg)	Diferencia de peso respecto a t = 5 s.	%	Diferencia de peso respecto al tiempo anterior (Kg).	%
5	450.39			0	
10	430.12	20.27	4.50	20.27	4.50
15	409.62	40.77	9.05	20.50	4.55
20	402.02	48.37	10.74	7.60	1.69
25	400.30	50.09	11.12	1.72	0.38

Tabla XI. Prueba No. 8

28.32 m³ de masa cocida "A" de 92.2° Brix.					
Tacho No.1					
Tiempo (s)	Peso azúcar descargada (Kg)	Diferencia de peso respecto a t = 5 s.	%	Diferencia de peso respecto al tiempo anterior (Kg).	%
5	491.55			0	
10	470.14	21.40	4.35	21.40	4.35
15	448.33	43.21	8.79	21.81	4.44
20	440.05	51.49	10.48	8.28	1.68
25	438.92	52.62	10.71	1.13	0.23

Tabla XII. Prueba No. 9

28.32 m³ de masa cocida "A" de 92.2° Brix.					
Tacho No.1					
Tiempo (s)	Peso azúcar descargada (Kg)	Diferencia de peso respecto a t = 5 s.	%	Diferencia de peso respecto al tiempo anterior (Kg).	%
5	496.98			0	
10	494.58	2.40	0.48	2.40	0.48
15	492.41	4.57	0.92	2.17	0.44
20	491.60	5.38	1.08	0.81	0.16
25	491.42	5.57	1.12	0.18	0.04

Tabla XIII. Capacidad de las boquillas de lavado de 0.00159 m de orificio, para diferentes tamaños de centrífuga

	5 boquillas	6 boquillas	7 boquillas
Presión	1.02 m x 0.61 m	1.02 m x 0.76 m	1.22 m x 0.76 m
Pa	m³/s	m³/s	m³/s
68950	0.00011	0.00013	0.00015
137900	0.00013	0.00015	0.00019
206850	0.00015	0.00019	0.00023
275800	0.00018	0.00022	0.00026
344750	0.00019	0.00023	0.00027
413700	0.0002	0.00024	0.00028

Fuente: *wester states machine company*

5. ANÁLISIS DEL RESULTADO DEL PROCESO

A continuación se presentan los resultados numéricos obtenidos en la investigación realizada en el Ingenio Trinidad, éstos desempeñan un papel importante desde el punto de vista operativo y de rentabilidad económica, de acuerdo al tipo de azúcar a producir.

El tiempo de lavado base que se utilizó para comparación es de $t = 5$ segundos, este es el tiempo mínimo requerido por la centrífuga para lograr que la miel que reviste el grano pase a través de las perforaciones de las telas y purgue.

5.1 Disminución del peso

Se ha determinado que para una centrífuga por lote el tiempo de ciclo total de operación para la fabricación de azúcar crudo es de 5 s y para azúcar blanco es de 15 s, siendo éstos los tiempos que normalmente se deben utilizar para fabricar azúcar comercial.

Cuando se requiere de la fabricación de azúcar de mayores especificaciones es cuando se incrementa el lavado, basados en tiempos, en segundos, determinándose que, al aplicar esta técnica, disminuye el peso del azúcar descargada por lote respecto al tiempo base de 5 s, de la siguiente manera: para $t = 10$ s disminuye en 18.37 Kg de azúcar equivalente a 3.72%, para $t = 15$ s 37.94 Kg de azúcar (7.68%), para $t = 20$ s 44.70 Kg de azúcar (9.05%) y para $t = 25$ s 45.90 Kg de azúcar (9.29%).

Se detectó, que la mayor parte de la pérdida de azúcar se produce en el intervalo de tiempo de 15 y 25 s, esto, se debe a que la sacarosa es muy soluble en agua provocando el incremento de azúcar disuelta en cada lote, que es función del número de solubilidad. Las pérdidas menores se producen en $t = 5$ s y $t = 10$ s debido a que las aristas del grano del cristal no han perdido su forma y no se han compactado, permitiendo el flujo de agua entre ellas.

Tabla XIV. Pesos promedio en kilogramos de azúcar descargada y porcentaje de disminución del peso respecto a $t = 5$ s

Tiempo (s)	Promedio de pesos (kg)	Diferencias de promedios de pesos (kg) respecto a $t = 5$ s	%
5	493.95	0.00	
10	475.58	18.37	3.72
15	456.01	37.94	7.68
20	449.24	44.71	9.05
25	448.06	45.90	9.29

Figura 17. Disminución del peso de azúcar descargada por lote respecto a $t = 5$ s

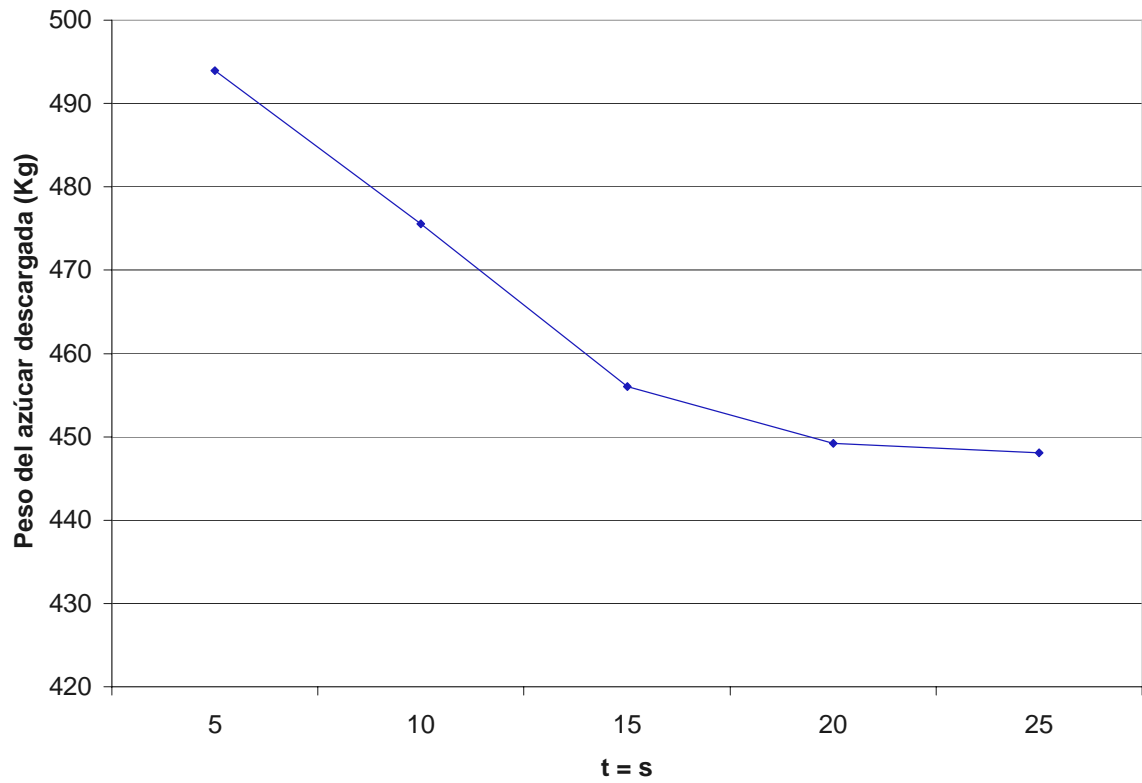
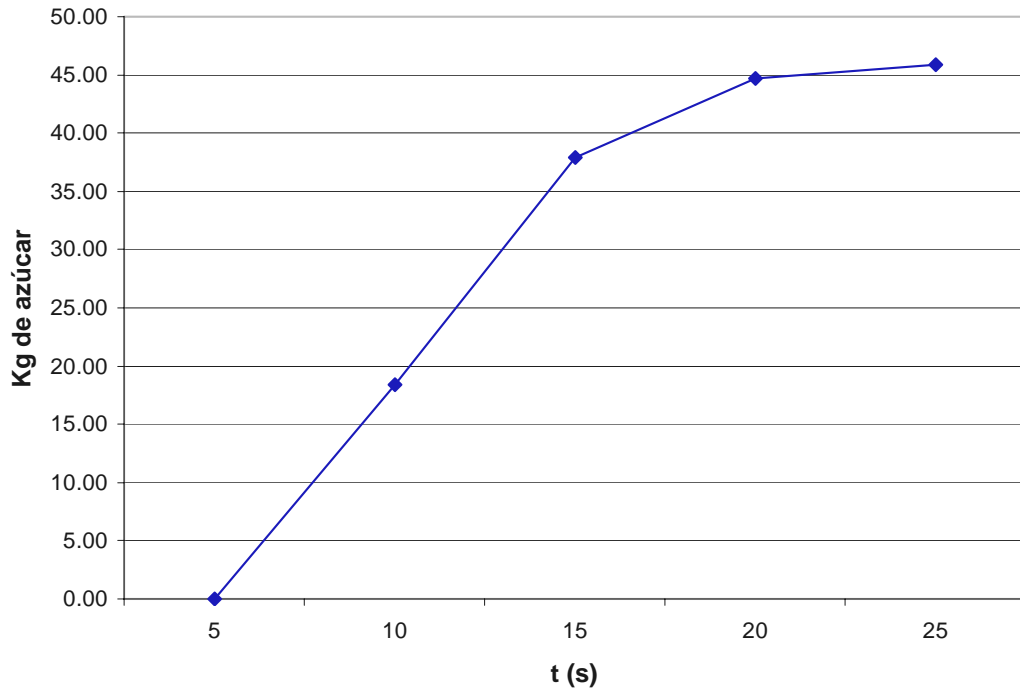


Figura 18. Diferencia de los promedios del azúcar descargada en kg de cada lote, para cada tiempo de lavado respecto a t = 5 s



5.2 Porcentaje de recirculación de agua

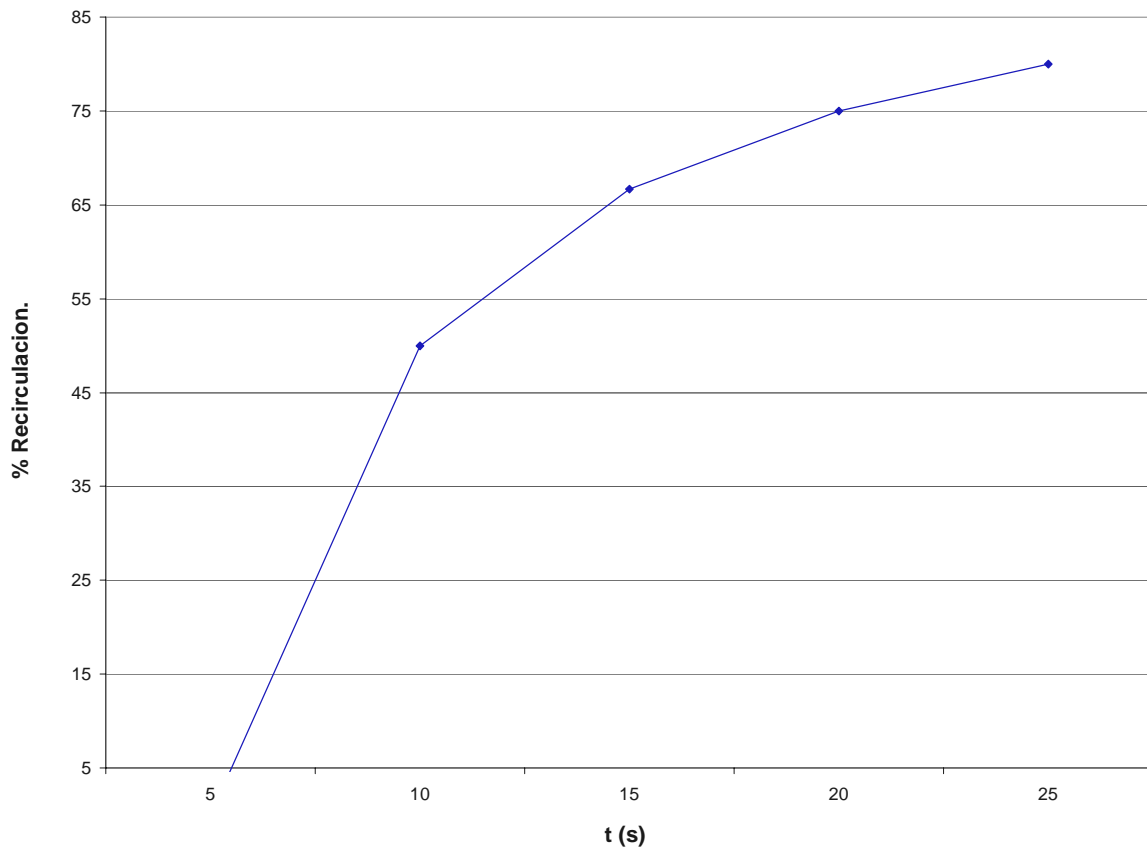
También se determinó, que al incrementar los tiempos de lavado se incrementa el porcentaje de recirculación de agua al proceso en 67.91% promedio, equivalente a $0.0056 \text{ m}^3/\text{s}$, redundando esto en mayor requerimiento de equipo e insumos. Al incrementar los tiempos de lavado no sólo disminuye la cantidad de azúcar descargada por lote, sino que también se incrementa el tiempo total del ciclo de operación de 152 s a 177 s para el valor más alto.

Tabla XV. Volumen de agua de lavado utilizada y porcentaje de agua recirculada, respecto a t = 5 s

Tiempo (s)	Volumen de agua (m ³)	Recirculación de agua (%)
5	0.0014	0.00
10	0.0028	50.00
15	0.0042	66.67
20	0.0056	75.00
25	0.0070	80.00

$$\% \text{ Recirculación} = \left\{ \frac{\text{volumen (t= 10 s)} - \text{volumen (t= 5s)}}{\text{volumen (t= 10 s)}} \right\} \times 100$$

Figura 19. Porcentaje de recirculación de agua vrs. tiempo de lavado



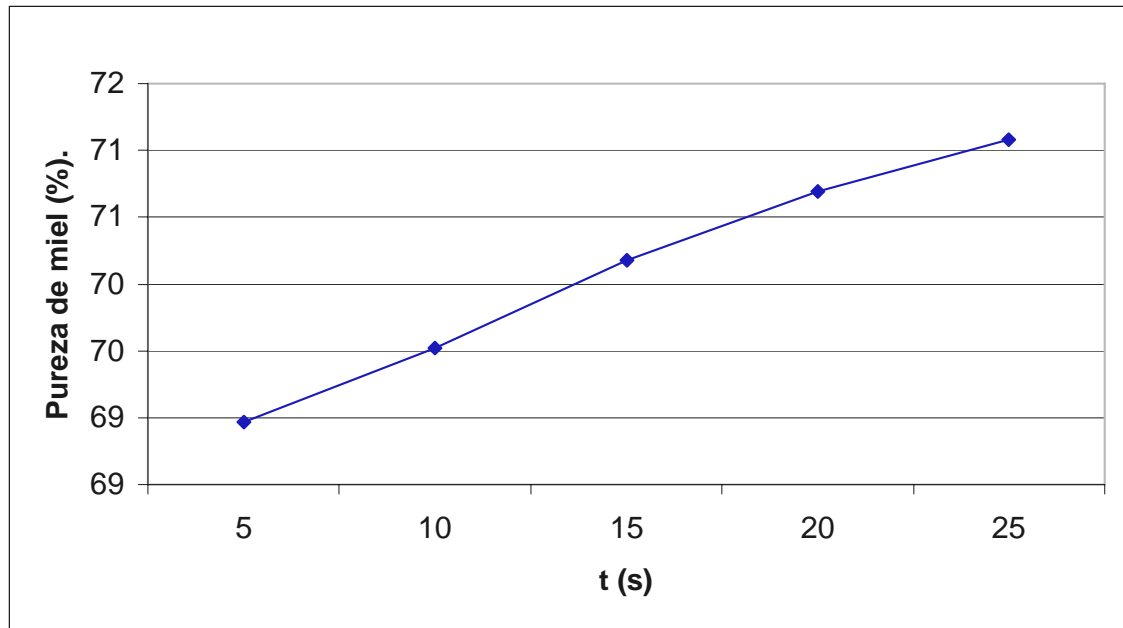
5.3 Aumento de la pureza de miel

Con respecto al incremento de pureza de la miel para cada tiempo de lavado, se pudo determinar que el comportamiento es contrario a la disminución del peso de azúcar descargada por lote respecto a $t = 5$ s, debido a que el azúcar que se disuelve pasa a formar parte de la miel de reproceso, comportándose de la manera siguiente: para $t = 5$ s el valor de la pureza fue 68.97% y para $t = 25$ segundos una pureza de 71.08%, que representa un incremento porcentual de 2.96% en el valor de la pureza de la miel, lo que se explica porque durante cada incremento en el tiempo de lavado se va eliminando el recubrimiento de miel del azúcar hasta quedar en el último tiempo de lavado solo el grano de azúcar que tiene un valor de polarización mas alto que la miel.

Tabla XVI. Promedio de los porcentajes de la pureza de la miel para los diferentes tiempos de lavado

Tiempo (s)	Pureza (%)
5	68.97
10	69.52
15	70.18
20	70.69
25	71.08

Figura 20. Pureza de la miel para cada tiempo de lavado



$$\text{PUREZA} = (\text{POL}/\text{BRIX})100$$

Tabla XVII. Valores promedios de las lecturas polarimétricas y °brix para la miel

Tiempo (s)	Promedio °Brix	Promedio Pol
5	69.20	47.73
10	69.47	48.30
15	70.27	49.32
20	70.42	49.78
25	70.81	50.33

5.4 Costos

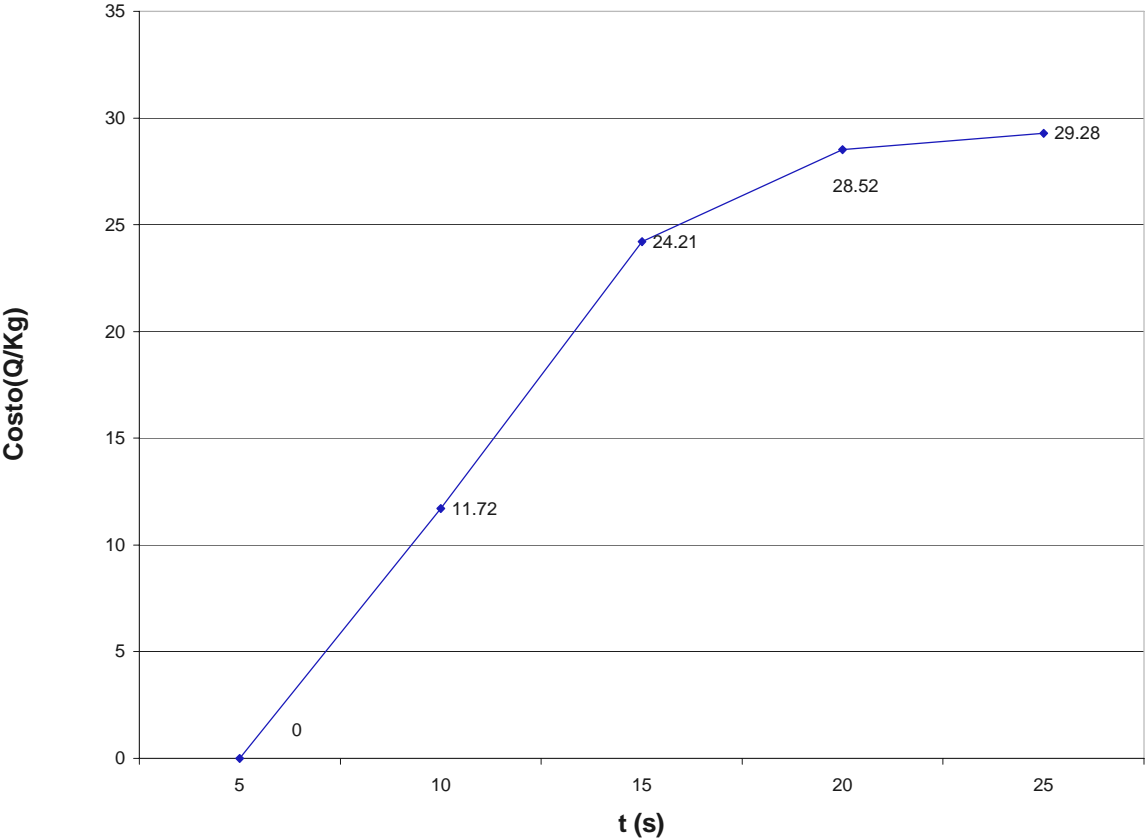
Sobre la base de los resultados obtenidos, se puede determinar que el impacto económico del peso y costo del azúcar por lote que no se envasa es para $t = 10$ s de 11.72 Q/Kg, para $t = 15$ s corresponde un valor de 24.21 Q/Kg, para $t = 20$ s refleja una pérdida de 28.52 Q/Kg y para $t = 25$ s significa una pérdida de 29.28 Q/Kg; datos que pueden servir de referencia para generar una pérdida proporcional basándose en los diferentes tamaños de centrifuga y producción.

Tabla XVIII. Peso y costo del azúcar por lote que no se envasa para cada tiempo de lavado, respecto a $t = 5$ s.

Tiempo (s)	Peso del azúcar no envasada (Kg)	Costo total (Q/Kg)
5	0.00	0
10	8.31	11.72
15	17.17	24.21
20	20.23	28.52
25	20.77	29.28

Base de cálculo = 1.41Q/Kg de azúcar

Figura 21. Costo del azúcar por lote que no se envasa respecto a $t = 5$ s



CONCLUSIONES

1. La mayor parte de pérdida de azúcar se produce en el intervalo de tiempo $t = 15$ s a $t = 25$ s, debido a que la sacarosa es muy soluble en agua, lo que incrementa el azúcar disuelta de cada lote, estando éste en función del número de solubilidad.
2. Al incrementar los tiempos de lavado, se incrementa el porcentaje de recirculación de agua en promedio a $=.0056$ m³/s equivalente a 67.91 % lo que redundaría en requerimiento de mayor equipo e insumos.
3. Al disminuir el peso de azúcar descargada por lote respecto al tiempo de lavado también incrementa la pureza de la miel en 2.96%
4. El impacto económico del peso y costo del azúcar por lote que no se envasa, en promedio, es de 26.36 Q/Kg, en el año 2004.

RECOMENDACIONES

1. Se debe establecer el tiempo óptimo de lavado del azúcar en función de las especificaciones del tipo de azúcar que se quiera producir, pues está demostrado que en el período de tiempo de 15 s a 25 s es cuando se obtiene el mayor porcentaje de azúcar que estará sujeta a un reproceso.
2. Aplicar a este proceso de fabricación, la investigación y actualización continua a fin de que sea rentable, paralelo a un análisis de costo/beneficio en el Ingenio Trinidad.
3. Involucrar a la alta gerencia del Ingenio Trinidad en la investigación y actualización continua de este proceso.

BIBLIOGRAFÍA

1. Arca, Manuel P. y Esparza, Raúl. **haciendo azúcar volumen 2**. Miami, Editorial Acra Corporation. 1984.
2. **Automatic electric drive centrifugal catalog. wester states machine company**, 1973.
3. Comisión para la unificación de métodos de laboratorio (CUMLA) laboratorio de ingenios azucareros de Guatemala, Centro América. **Manual de análisis de rutina para los laboratorios azucareros de Guatemala. 1996, Guatemala.**
4. **Contínuos centrifugal. Catalog. Western Stales Machine Company** 1982.
5. Chen, James C.P. **Manual del azúcar de caña**. 11a edición México, D.F. Editorial Limusa, 1991.
6. Eisner J. BASIC **Calculation For The Cane Sugar Factory**. 2a. edición, Inglaterra, editorial *fletcher and stewart limited*. 1988.
7. Geplacea. **Manual de técnicas analíticas de azúcares y mieles para América Latina y el Caribe**. Colección Geplacea. México: 1984.
8. Hugot, E. **Manual para ingenieros azucareros**. 11va. edición México, D.F. Editorial continental, 1984.
9. Morrel Flores, Ignacio. **Tecnología azucarera**. Cuba: Universidad Central de Las Viñas. 1984.
10. Perry, John H. **Manual del ingeniero químico**. Tomo II, México editorial Hispanoamericana, 1976.

11. Spencer, Guilford y George Meade. ***Cane sugar hand book***. 9na edición, Estados Unidos, Editorial John Wiley and sons, inc. 1948.
12. Tayasal. **Curso de especialización en ingeniería azucarera**. Fabricación y Laboratorio. Guatemala 1990.