



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Química

**CALIFICACIÓN DEL DESEMPEÑO DE UN FILTRO BANDA PARA
MAXIMIZAR LA RECUPERACIÓN DE SACAROSA EN LA CACHAZA
PROVENIENTE DE LA CLARIFICACIÓN DEL JUGO DE CAÑA**

Amílcar Eduardo Ayala González

Asesorado por la Inga. Claudia María Barrientos

Guatemala, noviembre de 2012

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**CALIFICACIÓN DEL DESEMPEÑO DE UN FILTRO BANDA PARA
MAXIMIZAR LA RECUPERACIÓN DE SACAROSA EN LA CACHAZA
PROVENIENTE DE LA CLARIFICACIÓN DEL JUGO DE CAÑA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

AMÍLCAR EDUARDO AYALA GONZÁLEZ

ASESORADO POR LA INGA. CLAUDIA MARÍA BARRIENTOS

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2012

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Juan Carlos Molina Jiménez
VOCAL V	Br. Mario Maldonado Muralles
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Jorge Emilio Godínez Lemus
EXAMINADOR	Ing. José Manuel Tay Oroxom
EXAMINADOR	Ing. Víctor Manuel Monzón Valdez
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

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

CALIFICACIÓN DEL DESEMPEÑO DE UN FILTRO BANDA PARA MAXIMIZAR LA RECUPERACIÓN DE SACAROSA EN LA CACHAZA PROVENIENTE DE LA CLARIFICACIÓN DEL JUGO DE CAÑA

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha 5 de marzo de 2012.



Amílcar Eduardo Ayala González

Guatemala, 02 de mayo de 2012

Ing. Williams Alvarez
Director de Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería, USAC
Presente.

Por medio de la presente informo a usted que procedí a revisar el informe final de trabajo de graduación del estudiante Amílcar Eduardo Ayala González, cuyo título es: **"CALIFICACIÓN DEL DESEMPEÑO DE UN FILTRO BANDA PARA MAXIMIZAR LA RECUPERACIÓN DE SACAROSA EN LA CACHAZA PROVENIENTE DE LA CLARIFICACIÓN DEL JUGO DE CAÑA"** el cual encuentro satisfactorio.

Cabe mencionar que las soluciones planteadas en este trabajo, constituyen un valioso aporte de nuestra Universidad a uno de los muchos problemas que padece el país principalmente en el apoyo técnico a empresas privadas, en la búsqueda de soluciones viables a los problemas que atraviesan y que al final, beneficiarán a la sociedad en general. En tal virtud, **LO DOY APROBADO**, solicitándole darle el trámite correspondiente.

Sin otro particular, me es grato suscribirme de usted.

Atentamente,



Claudia María Barrientos
cbarrientos@launion.com.gt



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

Guatemala, 13 de agosto de 2012
Ref. EI.Q.TG.320.2012

Señores
Área de Lingüística
Facultad de Ingeniería
Presente,

Estimados Señores:

Como consta en el Acta TG-257-2011-IF le informo que reunidos los Miembros de la Terna nombrada por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del:

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADUACIÓN

Solicitado por el estudiante universitario: **Amílcar Eduardo Ayala González**

Identificado con número de carné: **2005-11714**

Previo a optar al título de INGENIERO QUÍMICO.

Siguiendo los procedimientos de revisión interna de la Escuela de Ingeniería Química, los Miembros de la Terna han procedido a **APROBARLO** con el siguiente título:

CALIFICACIÓN DEL DESEMPEÑO DE UN FILTRO BANDA PARA MAXIMIZAR LA RECUPERACIÓN DE SACAROSA EN LA CACHAZA PROVENIENTE DE LA CLARIFICACIÓN DEL JUGO DE CAÑA

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por la Ingeniera Química: **Claudia María Barrientos**.

Habiendo encontrado el referido informe final del trabajo de graduación **SATISFACTORIO**, se autoriza al estudiante, proceder con los trámites requeridos de acuerdo a las normas y procedimientos establecidos por la Facultad para su autorización e impresión.

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"

Ing. Víctor Manuel Monzón Valdez
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química



C.c.: archivo



ACAAI

Agencia Centroamericana de Acreditación de Programas de Arquitectura y de Ingeniería



El Director de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor y de los Miembros del Tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química para revisar el Informe del Trabajo de Graduación del estudiante, **AMÍLCAR EDUARDO AYALA GONZÁLEZ** titulado: "**CALIFICACIÓN DEL DESEMPEÑO DE UN FILTRO BANDA PARA MAXIMIZAR LA RECUPERACIÓN DE SACAROSA EN LA CACHAZA PROVENIENTE DE LA CLARIFICACIÓN DEL JUGO DE CAÑA**".
Prócede a la autorización del mismo, ya que reúne el rigor, la secuencia, la pertinencia y la coherencia metodológica requerida.

"Id y Enseñad a Todos"

Ing. Víctor Manuel Monzón Valdez
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química



Guatemala, Noviembre de 2012

Cc: Archivo
VMMV/ale

Universidad de San Carlos
De Guatemala



Facultad de Ingeniería
Decanato

Ref. DTG.612.2012

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al trabajo de graduación titulado: **CALIFICACIÓN DEL DESEMPEÑO DE UN FILTRO BANDA PARA MAXIMIZAR LA RECUPERACIÓN DE SACAROSA EN LA CACHAZA PROVENIENTE DE LA CLARIFICACIÓN DEL JUGO DE CAÑA**, presentado por el estudiante universitario **Amilcar Eduardo Ayala González**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Alfredo Beber'.

Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
Decano en funciones



Guatemala, 22 de noviembre de 2012

/cc

ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Por ser la fuente y guía de mi vida.
- Mis padres** Sandra González y Amílcar Ayala, por ser modelos de perseverancia, responsabilidad y amor, este logro es de ustedes.
- Mi esposa e hijos** Silvia Sagastume, Víctor y Eduardo Ayala, por ser la inspiración total de mi ser.
- Mis hermanos** Víctor, Sandra, Betza, Eva, Alfonso, Amílcar Ayala, por compartir su cariño y apoyo invaluable en todo momento.
- Mis abuelos** Víctor Manuel Ayala y María Luisa Centeno, Gustavo González y Gudelia López, seguiré poniendo sus nombres en alto por siempre, los amo.

AGRADECIMIENTOS A:

- Dios** Por darme fortaleza y guiarme en el camino de la perseverancia.
- Mis padres** Sandra González y Amílcar Ayala, por haberme dado la vida y servirme de ejemplo e inspiración.
- Mi esposa** Silvia Sagastume, por su amor y apoyo incondicional.
- Mis hijos** Víctor y Eduardo Ayala, por alegrar cada día que paso junto a ellos.
- Mis hermanos** Víctor, Sandra, Betza, Eva, Alfonso, Amílcar Ayala, por el cariño y apoyo brindado en todo momento.
- Mis abuelos** Víctor Manuel Ayala y María Luisa Centeno, Gustavo González y Gudelia López, por brindarme su amor y estar al tanto de mí siempre.
- Mis tíos** Gracias por sus invaluable consejos y apoyo durante toda mi vida.

Mis primos	Agradezco a cada uno por los momentos compartidos.
Mis suegros	Mario Sagastume y Antonieta Moreira, por el apoyo brindado en todo momento.
Mis amigos	Por dejarme aprender con y de ellos y compartir a su lado durante estos años.
Mi asesora	Claudia Barrientos, por su colaboración, aprobación y el tiempo brindado al desarrollo del presente trabajo.
Ingenio La Unión S.A.	Por darme la oportunidad de desarrollarme profesionalmente.
La Facultad de Ingeniería	Por brindarme mucho conocimiento y experiencias enriquecedoras.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
RESUMEN	XIII
OBJETIVOS/HIPÓTESIS	XV
INTRODUCCIÓN	XVII
1. ANTECEDENTES	1
1.1. Justificación del problema	1
1.2. Determinación del problema	2
1.2.1. Definición	2
1.2.2. Delimitación	3
2. MARCO TEÓRICO	5
2.1. Aspectos generales	5
2.1.1. Producción actual	6
2.1.2. Misión de la fábrica	6
2.1.3. Política de calidad	6
2.2. Proceso de obtención de azúcar de caña	7
2.2.1. Extracción de jugo	8
2.2.1.1. Recepción y preparación de la caña ...	8
2.2.1.2. Molienda	9
2.2.2. Tratamiento de jugo	9
2.2.2.1. Sulfitación	10
2.2.2.2. Alcalinización	10

	2.2.2.3.	Clarificación	11
	2.2.2.4.	Filtración	11
	2.2.2.5.	Evaporación	12
	2.2.2.6.	Clarificación de meladura	13
	2.2.3.	Recuperación de sacarosa	14
	2.2.3.1.	Cristalización	14
	2.2.3.2.	Centrifugación	15
	2.2.4.	Acondicionamiento de azúcar	15
	2.2.4.1.	Secado y enfriado	16
	2.2.4.2.	Envasado y almacenaje del azúcar	16
2.3.		Cachaza.....	17
	2.3.1.	Composición de la cachaza.....	17
	2.3.2.	Formación de la cachaza	19
	2.3.3.	Factores agroindustriales que afectan la composición	21
2.4.		Filtros de cachaza	22
	2.4.1.	Filtros banda	22
	2.4.1.1.	Descripción técnica del filtro	23
	2.4.1.2.	Descripción de los periféricos	26
	2.4.1.3.	Operación del filtro banda	27
	2.4.2.	Filtro rotativo continuo al vacío	29
	2.4.2.1.	Descripción del filtro rotativo	29
	2.4.2.2.	Operación del filtro rotativo	30
3.		METODOLOGÍA.....	33
	3.1.	Variables.....	33
	3.2.	Delimitación del campo de estudio	35
	3.3.	Recurso humano	36
	3.4.	Recurso físico	36

3.4.1.	Equipo y cristalería.....	36
3.4.2.	Reactivos	37
3.5.	Técnica de investigación.....	38
3.6.	Recolección y ordenamiento de la información	38
3.7.	Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información.....	38
3.8.	Análisis estadístico	39
3.9.	Plan de análisis de los resultados	39
3.9.1.	Métodos y modelos	39
3.9.1.1.	Determinación de la media aritmética	40
3.9.1.2.	Determinación del error	40
3.9.1.3.	Varianza	40
3.9.1.4.	Desviación estándar	41
3.9.1.5.	Métodos ICUMSA	41
3.9.2.	Programas a utilizar para analizar los datos	42
3.10.	Procedimiento experimental	42
4.	RESULTADOS.....	43
4.1.	Análisis del pol de cachaza	43
4.2.	Análisis de jugo filtrado	47
4.3.	Zafra 2011-2012.....	49
5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	51
	CONCLUSIONES.....	55
	RECOMENDACIONES.....	57
	BIBLIOGRAFÍA.....	59
	APÉNDICES.....	61

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Formación de fosfatos de calcio	20
2.	Formación de flóculos	20
3.	Filtro banda de Technopulp	24
4.	Diagrama de flujo de la operación del filtro banda	26
5.	Filtro rotativo continuo al vacío	31
6.	Pol de cachaza variando el flujo de agua de imbibición	43
7.	Pol de cachaza variando la velocidad de la tela filtrante	44
8.	Pol de cachaza variando la velocidad del ventilador de vacío	44
9.	Pol de cachaza variando la dosis de floculante aplicado	45
10.	Pol de cachaza obtenido monitoreando el pH de la cachaza	45
11.	Curvas de sedimentación de diferentes floculantes	46
12.	Pol de cachaza obtenido diluyendo la cachaza alimentada	46
13.	Velocidad de sedimentación de la cachaza	47
14.	Porcentaje de retención de sólidos de los filtros de cachaza	48
15.	Bacterias en jugo filtrado	48
16.	Pol de cachaza promedio por día del filtro banda.....	50
17.	Pol de cachaza promedio por agua aplicada a la cachaza	50

TABLAS

I.	Composición de la cachaza	18
II.	Componentes del filtro banda	24
III.	Periféricos del filtro banda	25

IV.	Parámetros de operación del filtro banda	28
V.	Variables en la operación del filtro banda	34
VI.	Equipo y cristalería utilizada en la fase experimental.....	37
VII.	Reactivos utilizados en la fase experimental	37
VIII.	Porcentaje de retención de sólidos de los filtros de cachaza	47
IX.	Microbiología de jugo filtrado.....	49
X.	Análisis de los datos de pol de cachaza de dos zafras.....	49

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
\$	Dólar estadounidense
gpm	Galones por minuto
°Be	Grados Baumé
°Bx	Grados Brix
°C	Grados Celsius
°F	Grados Fahrenheit
g	Gramo
h	Hora
kg	Kilogramo
kWh	Kilowatt por hora
m	Metro
ml	Mililitro
mm	Milímetro
M	Millones
min	Minuto
ppm	Partes por millón (mg/Kg)
' o ft	Pie
%	Porcentaje
% P/V	Porcentaje peso/volumen
% V/V	Porcentaje volumen/volumen
pH	Potencial de hidrógeno
psig	Presión manométrica, libras por pulgada cuadrada
" o pulg	Pulgada

pulg Hg	Pulgadas de mercurio
qq	Quintal = 100 libras
ton	Tonelada corta = 2 000 libras
tc	Tonelada de caña (2 000 libras de caña)
TM	Tonelada métrica = 1 000 kilogramos
TMC	Tonelada métrica de caña
TMCD	Tonelada métrica de caña por día
TMVC	Tonelada métrica valor crudo
UFC/ml	Unidad formadora de colonia por mililitro

GLOSARIO

Alcalinización	Proceso que consiste en aplicar cal, ya sea como lechada de cal o sacarato, al jugo sulfitado o mezclado para neutralizar la acidez natural del jugo y formar sales insolubles de cal.
ASAZGUA	Asociación de Azucareros de Guatemala.
Bagacillo	Partículas muy pequeñas de bagazo, separadas ya sea del jugo clarificado o del bagazo final para ser adicionada a la cachaza para su filtración.
Bagazo	Residuo que sale de cada molino y usualmente el que sale del último molino, se utiliza como combustible en las calderas.
Brix	Es el porcentaje en peso de los sólidos contenidos en una solución de sacarosa pura, representa los sólidos que contiene una solución de azúcar.
Cachaza	Es el residuo que se obtiene durante el proceso de clarificación del jugo de caña, es de color café oscuro a negro y consiste principalmente en una mezcla de fibra de caña, sacarosa, cera, fosfatos de calcio, arena y tierra.

CIASA	Consultores de Ingenios Azucareros S.A., empresa que presta el servicio de consultoría a ingenios azucareros de Latinoamérica.
Clarificación	Es el proceso en el que se elimina la materia orgánica, tierra y cualquier materia extraña del jugo; consiste en sulfitación, alcalinización y decantación.
Decantación	Proceso de sedimentación del jugo alcalizado y caliente que separa el jugo claro de los sedimentos llamados cachaza.
Floculante	Polímero que aglutina los sólidos suspendidos en el jugo, provocando su precipitación.
Flóculos	Son conglomerados que se forman cuando los sólidos insolubles en el jugo se agrupan durante el proceso de floculación.
Imbibición	El proceso en el cual se aplica agua, generalmente a alta temperatura, a la cachaza para mejorar la extracción de sacarosa de este, mediante lixiviación. El agua que así se usa se llama agua de imbibición.
Ingenio	Planta industrial destinada a moler la caña y obtener azúcar como producto.
ISO	International Sugar Organization.

Jugo filtrado	Es el jugo resultante del lavado de la cachaza en los filtros rotativos al vacío o en filtros banda, este jugo es retornado al proceso de clarificación.
Meladura	Es el jugo clarificado concentrado que sale del último efecto del sistema de evaporadores, sin llegar al punto de saturación, que luego es enviado directamente hacia el proceso de evapocristalización en tachos o bien al proceso de clarificación por fosfoflotación.
Melaza	Se refiere al subproducto de todo el proceso de la fabricación o refinación del azúcar crudo, es un líquido denso y viscoso que se separa de la masa cocida final de baja calidad y del cual no se puede cristalizar más azúcar por los métodos usuales.
Pol	También llamada polarización, se define como la concentración de una solución de sacarosa pura en agua que tiene la misma rotación óptica que la muestra a la misma temperatura; para soluciones que contienen únicamente sacarosa en agua, el pol es una medida de la concentración de la sacarosa presente; para soluciones que contienen sacarosa y otras sustancias ópticamente activas, el pol es la suma algebraica de las rotaciones ópticas de los constituyentes.

Sacarosa	Es el compuesto orgánico que comúnmente se le llama azúcar y tiene la fórmula molecular $C_{12}H_{22}O_{11}$.
Sulfitación	Tratamiento del jugo crudo de caña o meladura con dióxido de azufre (SO_2) para producir azúcar blanca.
Turbidez	Es la expresión de la propiedad óptica de una muestra que causa que los rayos de luz sean dispersos y absorbidos, en vez de ser transmitidos en línea recta a través de la muestra.

RESUMEN

En el proceso de obtención de azúcar (sacarosa, $C_{12}H_{22}O_{11}$) a partir de la caña de azúcar se obtiene cachaza, que es un subproducto de la clarificación de jugo. La cachaza es de consistencia lodosa y contiene jugo rico en azúcar. La cachaza obtenida de los clarificadores se transporta a una estación de filtros para recuperar la mayor cantidad de jugo y luego la cachaza se envía al campo como abono sin que lleve azúcar.

El ingenio mantiene un control sobre el pol de la cachaza que se envía al campo. En la cachaza el pol es una medida de la sacarosa presente. Esta investigación evalúa el funcionamiento de un filtro banda, que recién adquirido tenía un funcionamiento irregular. Esto con el objetivo de mejorar el funcionamiento del filtro para reducir las pérdidas de azúcar en la cachaza.

La investigación se llevó a cabo en las instalaciones de los filtros de cachaza y el laboratorio de fábrica de Ingenio La Unión S.A. En esta investigación se evaluaron cuatro aspectos importantes en el funcionamiento del filtro que influyen de gran manera en el resultado de la filtración. Estos son el manejo del filtro banda, la instalación de los periféricos, la preparación de la cachaza y el floculante utilizado. Al evaluar estos aspectos se optimizó el funcionamiento del filtro banda para cumplir con las especificaciones requeridas por el ingenio.

Como parte de la evaluación en filtro banda, se comparó el jugo filtrado obtenido por el filtro banda, que es una tecnología relativamente nueva, con el jugo filtrado obtenido con los filtros rotativos al vacío que tienen varios años de ser utilizados para filtrar la cachaza. Al comparar el jugo filtrado se obtuvo una idea de la calidad del jugo filtrado que se regresa al proceso de clarificación.

OBJETIVOS

General

Calificar el desempeño del filtro banda en el proceso de filtrado de cachaza proveniente de la clarificación del jugo de caña de Ingenio La Unión S.A.

Específicos

1. Establecer las condiciones actuales del proceso de filtración de la cachaza.
2. Evaluar el efecto que tiene el agua de imbibición, la velocidad de tela filtrante, la velocidad del ventilador de vacío, la dosis de floculante y el pH de la cachaza en el proceso de filtración de la cachaza.
3. Evaluar las variables del proceso que influyen en el pol de cachaza, para mejorar el funcionamiento del filtro.
4. Determinar el rango de operación de las variables del proceso que minimicen el pol de cachaza.
5. Implantar mejoras de procedimiento para la operación óptima del filtro banda.

6. Reducir las pérdidas de azúcar en la cachaza a un pol de cachaza menor de 2%.

HIPÓTESIS

Es posible realizar una calificación del funcionamiento del filtro banda de cachaza en el área de clarificación del Ingenio La Unión S.A., para mejorar la operación de acuerdo con las especificaciones del filtro y recuperar una mayor cantidad de sacarosa al disminuir el pol de la cachaza a menos de 2%.

INTRODUCCIÓN

Ingenio La Unión S.A. es uno de los trece ingenios azucareros que forman parte de la agroindustria azucarera de Guatemala. El ingenio comenzó operaciones el 20 de enero de 1970 en la Finca Belén, situada en Santa Lucía Cotzumalguapa, Escuintla.

En el proceso de obtención de azúcar (sacarosa, $C_{12}H_{22}O_{11}$) a partir de la caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.) se obtiene un subproducto de la clarificación de jugo. Este subproducto es la cachaza y contiene entre 60-70%¹ de jugo rico en azúcar. La cachaza producida representó el 3,78%² del total de la caña molida en la zafra 2010-2011. La cachaza obtenida de los clarificadores se manda a una estación de filtros para recuperar la mayor cantidad de jugo y luego la cachaza se envía al campo como abono sin que lleve azúcar.

Durante la zafra 2010-2011 inició operaciones un filtro banda para cachaza de reciente adquisición. La cachaza es el sedimento extraído por bombas de las bandejas de los clarificadores, para ser procesados en los filtros. Contiene una mezcla de sólidos insolubles con jugo de caña rico en sacarosa y por ese motivo se filtra para extraer el jugo y dejar la menor cantidad de sacarosa en la cachaza que se regresa al campo como abono.

Este filtro es de tecnología brasileña y tiene una capacidad nominal para filtrar 160 galones por minuto (gpm) de cachaza con 110 galones por minuto de agua de imbibición y obtener un pol menor a 2%³.

¹ HUGOT, E. Handbook of cane sugar. p. 473.

² Ingenio La Unión S.A. Reporte de laboratorio de fábrica, Zafra 2010-2011.

³ Technopulp, PC VPB 260. p. 2.

El filtro banda durante sus primeros 20 días de funcionamiento ha tenido un flujo de cachaza promedio de 80 galones por minuto y un pol promedio de 3,5%.⁴ Para obtener un buen resultado en el pol se debe realizar un análisis de todas las variables; el agua de imbibición, la velocidad de tela filtrante, la velocidad del ventilador de vacío, la dosis de floculante y el pH de la cachaza; que afectan el funcionamiento del filtro y por consiguiente afectan el pol de la cachaza y la calidad del jugo filtrado.

⁴ Ingenio La Unión S.A. Reporte de laboratorio de fábrica, Zafra 2010-2011. Día 20.

1. ANTECEDENTES

“Ingenio La Unión S.A., es un ingenio que forma parte de la agroindustria azucarera de Guatemala. El ingenio se caracteriza por utilizar nuevas tecnologías en los procesos de obtención de azúcar a partir de la caña. Para la zafra 2008-2009, Ingenio La Unión S.A. decidió ampliar su capacidad de operación de 12 000 a 18 000 toneladas de caña molida por día. Esta decisión afectó la estación de filtros ya que se debía aumentar el área filtrante para el procesamiento de la cachaza. Debido a la necesidad de aumentar la capacidad de procesamiento de la cachaza se adquiere un filtro banda para esa zafra. Al finalizar la zafra 2009-2010 se realizó un análisis de capacidad en la estación de filtros que determinó que el ingenio debía adquirir otro filtro para procesar la cachaza.”⁵

El filtro banda adquirido para la zafra 2010-2011 presenta diferencias en el diseño respecto al filtro existente en el ingenio. La mayor diferencia es en el sistema de vacío, ya que el filtro antiguo utiliza una bomba de vacío mientras el filtro nuevo utiliza un ventilador. Esto hace diferente su operación, por lo que es necesario realizar un estudio de sus variables.

1.1. Justificación del problema

En el proceso de producción de azúcar en el Ingenio La Unión S.A. se aplican varias de las operaciones unitarias, que son un campo importante del ingeniero químico. Una de esas operaciones es la filtración de cachaza.

⁵ CIASA. Estudio de ampliación para moler 18 000 TCD. Ingenio La Unión 2007. p. 21.

La investigación se realizó debido a que el funcionamiento del filtro banda era irregular en su operación y no cumplía con los parámetros de pol de cachaza de Ingenio La Unión. No se había realizado una evaluación para mejorar su funcionamiento y lograr bajar el pol de cachaza a menos de 2%, lograrlo representaría una recuperación de azúcar mejorando el proceso de filtración y, obteniendo una remuneración económica. Por lo tanto se buscó aportar procedimientos que permitan una mejor manipulación del filtro para mejorar en el proceso y así obtener una mayor eficiencia.

Bajar 0,5 unidades del pol de la cachaza del filtro banda representa una recuperación económica de \$ 41 000,00 durante una zafra. Esto asumiendo una zafra de 2 500 000 de toneladas de caña molida, con el 3,75% de cachaza y que el filtro banda procesa el 20% de esa cachaza.

1.2. Determinación del problema

En la estación de filtros se tiene un filtro banda adquirido para la zafra 2010-2011 que presenta problemas en su funcionamiento. Se observa que la cachaza que entra al filtro no drena rápidamente el jugo que lleva y existe un desborde de lodo por los extremos del filtro.

1.2.1. Definición

Los problemas en su funcionamiento se reflejan en la cachaza que sale del filtro y luego es analizada en el laboratorio. El pol se utiliza para evaluar el rendimiento del filtro, considerando un pol debajo de 2% como un buen rendimiento.

“El problema fundamental en la cachaza obtenida con el filtro banda es que tiene un pol promedio mayor a 3,5% en los primeros 20 días de funcionamiento y este ingenio especifica que el pol de la cachaza debe estar por debajo de 2%.”⁶

1.2.2. Delimitación

Se contempló evaluar aspectos importantes en el funcionamiento del filtro que influyen en el resultado de la filtración. Estos son el manejo del filtro banda, la instalación de los periféricos, la preparación de la cachaza y el floculante utilizado.

Además, se comparó el filtro rotativo al vacío y el filtro banda con respecto a la calidad de jugo filtrado por microbiología y sólidos insolubles recirculados.

⁶ Ingenio La Unión S.A. Reporte de Laboratorio de Fábrica, Zafra 2010-2011. Día 20

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Aspectos generales

“La agroindustria azucarera de Guatemala produjo 2 048 142 toneladas métricas de azúcar (4 4525 046 quintales) para el período 2010-2011.”⁷ “La caña molida fue de 19 219 653 toneladas métricas y el área total cosechada fue de 230 000 hectáreas.”⁸ Guatemala ocupa el segundo lugar dentro de los países exportadores de América Latina y el cuarto lugar a nivel mundial. “El primer lugar corresponde a Brasil (26,27 millones de toneladas métricas valor crudo, MTMVC) y el segundo a Tailandia (5,51 M TMVC), el tercero a Australia (3,7 M TMVC), el cuarto lo ocupa Guatemala (1,65 M TMVC) y el quinto Colombia (0,81 M TMVC).”⁹

“Guatemala tiene una exportación neta de 4,18% sobre la exportación mundial. Cuenta con 13 ingenios azucareros situados en el litoral del Pacífico.”¹⁰ De acuerdo con el IV Censo Nacional Agropecuario, el 97,15% del área cosechada a nivel nacional se encuentra concentrada en cuatro departamentos: Escuintla (81,90%), Suchitepéquez (11,11%), Santa Rosa (2,10%), Retalhuleu (2,03%).

⁷ ASAZGUA. Comparativo de Producción Zafra 2009-2010 y Zafra 2010-2011. Cuadro 28.

⁸ Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación. www.maga.gob.gt. Consulta: febrero de 2012.

⁹ ISO. World Sugar Balance. November 2010.

¹⁰ ASAZGUA. www.azucar.com.gt/ingenios.html Consulta: julio de 2011.

2.1.1. Producción actual

“Ingenio La Unión S.A. tiene una capacidad instalada de 18 000 toneladas de caña molida al día neto y la razón de molienda efectiva durante la zafra 2010-2011 fue de 17 667 toneladas al día empleándose 147 días de zafra. El ingenio molió 2 389 221 toneladas métricas de caña y produjo 190 122 toneladas métricas (4 133 086 quintales) de azúcar cruda a granel y 84 197 toneladas métricas (1 829 874 quintales) de azúcar blanca, siendo, el 31% de la producción azúcar blanca y el 69% restante de azúcar cruda a granel como producto final.”¹¹

“Además de azúcar, se produjo 86 065 toneladas métricas (15 740 016 galones) de melaza (85°Bx), y se vendieron 124 772 477 kilo watt hora donde 98,6% se generó con bagazo.”¹²

2.1.2. Misión de la fábrica

La misión de la fábrica de Ingenio La Unión S.A. es: “Ser una corporación agroindustrial, comprometida a mantener niveles de rentabilidad adecuados y sostenidos contribuyendo a fortalecer las inversiones estratégicas necesarias, que aumenten la capacidad competitiva de la corporación en el mercado global del azúcar y eléctrico y le permita ser instrumento de superación para todos los integrantes de la organización.”¹³

¹¹ Ingenio La Unión S.A. Reporte de Fabricación Zafra 2010-2011, Fin de Zafra Azucarera. Día 147.

¹² *Ibid.* Día 147.

¹³ Ingenio La Unión S.A. Centro Documental, Producción de Edulcorantes. Misión.

2.1.3. Política de calidad

La política de calidad de la fábrica de Ingenio La Unión S.A. es: “Producir y comercializar caña, azúcar y electricidad, para satisfacer los requerimientos de calidad de sus clientes, a través de la mejora continua de los procesos y el desarrollo del personal. El ingenio está comprometido con la productividad y rentabilidad de la empresa, para ser competitivo en los mercados. Manteniendo una cultura ética coherente con la legislación del país.”¹⁴

2.2. Proceso de obtención de azúcar de caña

“El proceso industrial para obtener azúcar se compone de varios procesos para convertir el jugo de caña en cristales. El proceso puede variar ligeramente dependiendo del tipo de azúcar que se produzca.

Ingenio La Unión tiene dos líneas de producción simultáneas. Una para producir azúcar crudo y otra para producir azúcar blanco. La diferencia entre las dos líneas, es que para producir azúcar crudo, el jugo no pasa por el proceso de sulfitación ni se sulfita la meladura.

El ingenio tiene dividido el proceso en áreas más pequeñas con procesos específicos. Las áreas del proceso del Ingenio La Unión son:

- Extracción del jugo
- Tratamiento del jugo
- Recuperación de sacarosa
- Acondicionamiento de azúcar”¹⁵

¹⁴ Ingenio La Unión S.A. Centro Documental, Producción de Edulcorantes. Política de calidad.

¹⁵ *Ibíd.* Procedimientos e Instructivos.

2.2.1. Extracción de jugo

El proceso de extracción de jugo se divide en dos procesos que se llevan a cabo dentro del ingenio:

- Recepción y preparación de la caña
- Molienda

2.2.1.1. Recepción y preparación de la caña

La recepción de la caña inicia con el control del peso con básculas, de las unidades que transportan la caña de azúcar en el ingenio y que se encuentran al ingreso del área industrial. En este punto se determina la calidad de la materia prima.

La caña que llega a la fábrica se descarga sobre las mesas de alimentación por medio de vibradores de caña con capacidad de 50 toneladas métricas. Algunos ingenios aplican agua para lavado, eliminando así sólidos o materia extraña como tierra, sales, minerales, piedras y otros que se adhieren a la caña en el campo; pero implica una contaminación grande de agua. Ingenio La Unión no lava la caña, ahorrando miles de galones de agua cada año. “En la Zafra 2010-2011 se utilizó un aproximado de 3 000 galones por minuto.”¹⁶

Luego de pasar por la mesa, la caña se somete a un proceso de preparación antes de entrar a molinos. Esta preparación consiste en romper y desfibrar las celdas de los tallos por medio de troceadoras, picadoras oscilantes y desfibradoras. Esto permite exponer las fibras de la caña facilitando la extracción de jugo que se realiza en los molinos.

¹⁶ Ingenio La Unión S.A. Registro Sistema de Aguas. Zafra 2007-2008, Zafra 2010-2011.

2.2.1.2. Molienda

La extracción del jugo de caña se efectúa en dos tandem de molinos. El tandem A consiste en seis molinos de cuatro mazas y el tandem B en cinco molinos de cuatro mazas; obteniéndose el jugo mediante la compresión.

Durante el proceso se hace pasar el colchón de caña entre las mazas y mediante presión se extrae el jugo que se recolecta en tanques. En el recorrido de la caña por el molino, se le agrega agua para lograr extraer la sacarosa que contiene el material fibroso que pasa a través de todas las unidades que componen dicho molino. A este proceso de agregar agua se le llama imbibición. Para hacer más eficiente el proceso de molienda, los jugos pobres de los molinos posteriores se aplican nuevamente en el proceso.

El bagazo que sale de la última unidad de molienda se conduce a las calderas para que sea utilizado como combustible y produzca el vapor de alta presión que se emplea en los turbogeneradores, con el fin de producir la energía eléctrica requerida por el ingenio y la energía suministrada a la red pública de energía eléctrica.

2.2.2. Tratamiento de jugo

El jugo que exprimen los molinos es ácido, turbio y de color verde oscuro. En la fase de clarificación se busca separar la materia orgánica, tierra y cualquier materia extraña del jugo. Los procesos para tratamiento del jugo son la clarificación y evaporación.

La clarificación consiste en la eliminación de impurezas y colorantes presentes en el jugo de caña y tiene cuatro etapas que son:

- Sulfitación
- Alcalinización
- Decantación
- Filtración

2.2.2.1. Sulfitación

“La sulfitación consiste en la absorción de anhídrido sulfuroso (SO_2), por el jugo, bajando su pH de 5,5 a 4,5.”¹⁷ La sulfitación se realiza en una columna de absorción que tiene, en su interior, platos perforados. Se bombea el jugo a la parte superior de la torre y desciende por gravedad a través de los platos en contracorriente con el anhídrido sulfuroso (SO_2) gaseoso, aspirado por un eyector instalado en la cima de la columna.

2.2.2.2. Alcalinización

Se utiliza cal (CaO) y calor como agentes clarificadores para la eliminación de las impurezas solubles como insolubles. La cal se agrega al jugo en forma de lechada de cal, la cual es preparada con una determinada cantidad de cal (CaO) por tonelada de caña. La cantidad que se va a suministrar depende del pH del jugo que se obtiene a través de los instrumentos instalados. “La lechada de cal neutraliza la acidez natural del jugo y forma sales insolubles de cal principalmente en forma de fosfato de calcio.”¹⁸

El jugo que sale de la alcalinización es calentado con vapor en intercambiadores de calor de coraza y tubos e intercambiadores de calor de placas hasta alcanzar una temperatura de 102-105 grados Celcius ($^{\circ}\text{C}$).

¹⁷ HUGOT, E. Handbook of cane sugar. p. 411.

¹⁸ BATULE, Eduardo. La clarificación del jugo de la caña y la meladura. p. 96.

Luego pasa por un tanque flash, se agrega floculante y se dispone en tanques clarificadores. La calefacción del jugo alcalinizado, hasta el punto de ebullición o un poco más allá de ese punto, coagula la albúmina y otras grasas presentes.

2.2.2.3. Clarificación

Es la etapa de limpieza del jugo, por la remoción de las impurezas floculadas en los tratamientos anteriores. Este proceso se realiza de forma continua en un equipo denominado clarificador o decantador, que tiene varios compartimentos, con la finalidad de aumentar la superficie de decantación. El jugo decantado se retira de la parte superior de cada compartimiento y se envía al sector de evaporación para su concentración.

Las impurezas sedimentadas, con una concentración de sólidos de aproximadamente 10 grados Baumé (°Be), constituyen el lodo, denominado cachaza, que se retira del decantador por el fondo y se envía a la estación de filtración para recuperar el azúcar contenido en él. El tiempo de residencia del jugo en el decantador, dependiendo del tipo de equipo empleado, varía de 15 minutos a 4 horas y la cantidad de lodo retirado representa el 15% a 20% del peso del jugo que entra en el clarificador.

2.2.2.4. Filtración

“La cachaza se somete a un proceso de filtración al vacío para recuperar el azúcar en ella. Inicialmente a la cachaza se le agrega bagacillo, cal y floculante para aumentar su filtrabilidad”¹⁹, después se bombea hacia filtros banda o rotativos al vacío, donde se separan los sólidos del jugo resultante.

¹⁹ PEÑARANDA, Jaime. Clarificación de jugo y meladura, Filtración de lodos. p. 93-112.

En los filtros se aplica agua caliente con aspersores para minimizar la cantidad de sacarosa residual en la cachaza. La torta de cachaza que sale de los filtros se conduce por bandas transportadoras a tolvas para recogerla en vagones, pesarla y disponerla en el campo como estabilizador de suelos pobres en materia orgánica. “La cachaza es el resultado de la clarificación y es un compuesto rico en nutrientes como el fósforo, nitrógeno, calcio, magnesio, sodio y potasio entre otros”²⁰, que se recupera por medios mecánicos, se valora y se transporta como un subproducto al campo.

El jugo turbio resultante se regresa al tanque de jugo alcalinizado de tal manera que el jugo filtrado se clarifica nuevamente. Este jugo filtrado todavía contiene cierta cantidad de sólidos y si existe una mala filtración hay una mayor recirculación de sólidos.

2.2.2.5. Evaporación

“En esta etapa el jugo clarificado se concentra utilizando dieciocho evaporadores repartidos en cinco efectos tanto para la línea de blanco como la línea de crudo. En la evaporación se elimina el 75% de agua que está contenida en el jugo.”²¹ Para mantener una buena eficiencia en la evaporación, dieciséis evaporadores están siempre en operación, mientras que dos evaporadores están en fase de limpieza.

La operación es relativamente sencilla debido a que se fijan las condiciones de entrada, salida, nivel de cada evaporador y extracción de vapores vegetales. La evaporación se realiza en evaporadores tipo Roberts en los cuales el vapor y el jugo se encuentran en cámaras separadas que fluyen en el mismo sentido.

²⁰ MORALES, Erwin. Evaluación del efecto de la cachaza, nitrógeno y fósforo en caña de azúcar. p. 12.

²¹ HUGOT, E. Handbook of cane sugar. p. 504.

“Durante este proceso, la concentración de sólidos se incrementa de 15 - 18 grados Brix (°Bx) en el jugo clarificado, a 65 °Bx en el licor obtenido llamado meladura.”²²

“El agua condensada de los evaporadores se utiliza en distintos puntos de la fábrica de la siguiente forma:”²³

- Condensado del 1er efecto se utiliza en las calderas.
- Condensado del 2do, 3er y 4to efecto se usa como agua caliente en fábrica, sobre todo como agua de lavado en las centrífugas, adición a los tachos y como agua de lavado en los filtros de cachaza e intercambiadores de calor.
- El vapor del 5to efecto se condensa y se regresa al sistema de recirculación de agua.

2.2.2.6. Clarificación de meladura

“La meladura que viene de evaporadores pasa por un calentamiento que tiene como objetivo subir la temperatura hasta el punto en que no haya destrucción del azúcar y reducir la viscosidad.”²⁴ Luego la meladura pasa por un tanque reactor donde se le agrega ácido fosfórico, sacarato y decolorante. Al final del tanque, a la meladura se le agrega floculante y aire, todo con el fin de formar coágulos. Estos coágulos flotan arrastrando impurezas formando una espuma, que es retirada de la superficie del tanque clarificador de meladura.

²² Ingenio La Unión S.A. Centro Documental, Producción de Edulcorantes. Procedimientos e instructivos CD-U-PE-017.

²³ *Ibíd.* CD-U-PE-016.

²⁴ HUGOT, E. Handbook of cane sugar. p. 627.

La meladura después se clarifica por flotación. Este proceso pretende eliminar turbidez y las últimas impurezas generadoras de color a la meladura. Se adiciona ácido fosfórico a la meladura sólo para la elaboración de azúcar blanco, sustancia que permite blanquear el azúcar. Pero también se adiciona aire, cal y floculante para todas las azúcares en general.

2.2.3. Recuperación de sacarosa

La meladura ya clarificada se traslada a los tanques de tachos del proceso de recuperación de sacarosa. En el proceso de recuperación de sacarosa se producen los cristales de azúcar durante la cristalización y se separan los cristales de las mieles por medio de centrifugación.

2.2.3.1. Cristalización

La cristalización del azúcar se efectúa en 16 tachos, evaporadores de simple efecto, en donde se requieren condiciones óptimas de presión de vapor, vacío y concentración, para lograr una cristalización controlada. Cada tacho está equipado con bomba de vacío de tipo anillo líquido y cada tacho tiene su condensador barométrico.

El propósito de la etapa de cristalización es obtener un cristal con características adecuadas tanto en tamaño como en número y el agotamiento de las mieles, con el fin de recuperar la mayor cantidad posible de sacarosa. El producto que se obtiene es una mezcla de cristales de azúcar y miel llamada masa cocida. La masa cocida se hace pasar por cristalizadores para agotar las mieles por enfriamiento. Luego la masa es enviada al mezclador ubicado en la estación de centrifugas.

2.2.3.2. Centrifugación

La masa cocida del mezclador se hace pasar a máquinas giratorias llamadas centrífugas. Aquí se separan los cristales de azúcar de la miel restante. La miel pasa a través de las telas, los cristales quedan atrapados dentro de las centrífugas y luego se lavan con agua. Las mieles vuelven a los tachos o bien se utilizan como materia prima para la producción de alcohol en las destilerías. “El canasto cilíndrico de la centrífuga, que está suspendido de una flecha tiene sus costados perforados y forrados de tela metálica, entre el forro y el costado hay láminas de metal que contienen perforaciones.”²⁵

La centrifugación se lleva a cabo con veintiocho centrífugas, que tiene como objeto la separación de los cristales y las mieles. Las centrífugas están distribuidas según su línea de producción y tipo de masa. Cuando el ciclo finaliza se descarga el azúcar a un conductor que la transporta hasta las máquinas secadoras.

2.2.4. Acondicionamiento de azúcar

El contenido de humedad del azúcar al finalizar la separación centrífuga no mantiene un nivel apropiado para su manipulación y almacenamiento. En el proceso de acondicionamiento de azúcar el azúcar se seca y enfría para su almacenamiento y disposición final.

²⁵ REIN, Peter. Cane sugar engineering. p. 427-442.

2.2.4.1. Secado y enfriado

“La función de secado busca entonces reducir el contenido de humedad del azúcar hasta un valor lo bastante bajo para impedir el desarrollo de microorganismos que puedan ocasionar el deterioro del producto o en el peor de los casos, su pérdida.”²⁶

“La humedad del azúcar blanco producido debe oscilar entre 0,026 y 0,037% a una temperatura de 35 grados Celsius y para el azúcar crudo entre 0,2 y 0,3% a una temperatura de 38,5 grados Celsius.”²⁷ El secado se realiza en secadores rotatorios y luego el azúcar pasa al enfriado. El enfriamiento del azúcar se realiza en un tambor metálico a través del cual pasa aire en flujo contracorriente succionado por un extractor. El aire que pasa por el secador arrastra consigo una pequeña cantidad de polvo de azúcar, siendo necesario la utilización de aspersores para la recuperación del azúcar arrastrada, retornándolo posteriormente al proceso.

2.2.4.2. Envasado y almacenaje del azúcar

De la enfriadora, el azúcar pasa a una faja transportadora que luego es introducida a un elevador y deposita el azúcar en las fajas que llenan unas tolvas, conectadas directamente con las envasadoras de sacos o jumbos. Máquinas de costura industriales realizan el cierre del saco, que está listo para el almacenaje. “El azúcar blanco es almacenado en sacos de 50 kilogramos o jumbos de 1 000 - 1 400 kilogramos en lugares previamente determinados, facilitando el control de calidad.”²⁸

²⁶ REIN, Peter. Cane sugar engineering. p. 467.

²⁷ Ingenio La Unión S.A. Centro Documental, Producción de Edulcorantes. Procedimientos e Instructivos. CD-U-PE-020.

²⁸ *Ibíd.*

El azúcar crudo de exportación sale directamente de la enfriadora a las bodegas de almacenamiento. En las bodegas se carga a granel en camiones que la transportan al puerto de embarque.

2.3. Cachaza

“La cachaza es el residuo que se obtiene del filtrado, durante el proceso de clarificación del jugo de caña en los ingenios azucareros. Es un material café oscuro o negro y consiste principalmente en una mezcla de fibra de caña, sacarosa, cera, fosfatos de calcio, azufre, arena y tierra. La mayor parte de estos componentes procede de la molienda de la caña. Los fosfatos de calcio y el azufre se agregan durante el proceso de neutralización y clarificación del jugo de caña.”²⁹

El residuo que se obtiene por sedimentación del jugo suspendido y con posterioridad se somete a filtración se le denomina cachaza y torta de cachaza al residuo que se descarga de los filtros para ser utilizado como abono. Su constitución depende de varios factores: tipo de suelo, variedad de caña, tipo de cosecha, extracción de jugo, cantidad de lechada de cal adicionada, entre otros; así como, los métodos de filtración empleados.

2.3.1. Composición de la cachaza

La cachaza puede considerarse como un subproducto de la producción de azúcar. Al clarificar el jugo contiene gran parte de materia orgánica coloidal dispersa, la cual al alcalinizarse precipita con los aniones orgánicos en forma de sales de calcio, junto con otros materiales que son arrastrados en estos precipitados.

²⁹ PEÑARANDA, Jaime. Clarificación de jugo y meladura, filtración de lodos . p. 4.

“Dentro de los componentes de la cachaza se aprecia un 75% de agua, de 2-3% de cera cruda, 7% de arcilla y 15% de bagacillo y azúcares.”³⁰ Los componentes químicos de la cachaza muestran variaciones de acuerdo con el lugar y las condiciones de obtención.

En general se observa que contiene gran cantidad de nitrógeno y fósforo, entre otros elementos. “El nitrógeno se presenta como proteínas y otras formas nítricas y amoniacaes más simples. El fósforo se encuentra en combinaciones orgánicas complejas como fosfolípidos y nucleoproteínas y algunas veces como fosfatos de calcio formados del proceso de clarificación.”³¹

Tabla I. **Composición de la cachaza**

No.	Componente	g / 100g de materia seca
1	Sacarosa	5 - 15
2	Cera	5 - 15
3	Bagacillo	15 - 30
4	Proteína (N x 6.25)	5 - 15
5	Pectina	1 - 5
6	Cenizas	9 - 20
7	SiO ₂	4 - 10
8	CaO	1 - 4
9	P ₂ O ₅	1 - 3
10	MgO	0,5 - 1,5

Fuente: VAN DER POEL, P. W. Sugar technology. p. 555.

³⁰ MORALES, Erwin. Evaluación del efecto de la cachaza, nitrógeno y fósforo en caña de azúcar. p. 12.

³¹ Ibíd. p. 13.

2.3.2. Formación de la cachaza

La cachaza se forma cuando los sólidos insolubles suspendidos en el jugo se agrupan en flóculos y son separados por sedimentación o filtración. Para formar los flóculos se aplica un floculante al jugo antes de entrar a los clarificadores. "Las partículas en suspensión en el jugo tienen carga negativa debido a una capa de proteína adherida, por consiguiente se repelen unas a otras y permanecen dispersas en el jugo. Además, estas partículas contienen una capa adsorbida de proteínas o polisacáridos que tienen una fuerte asociación con el agua."³²

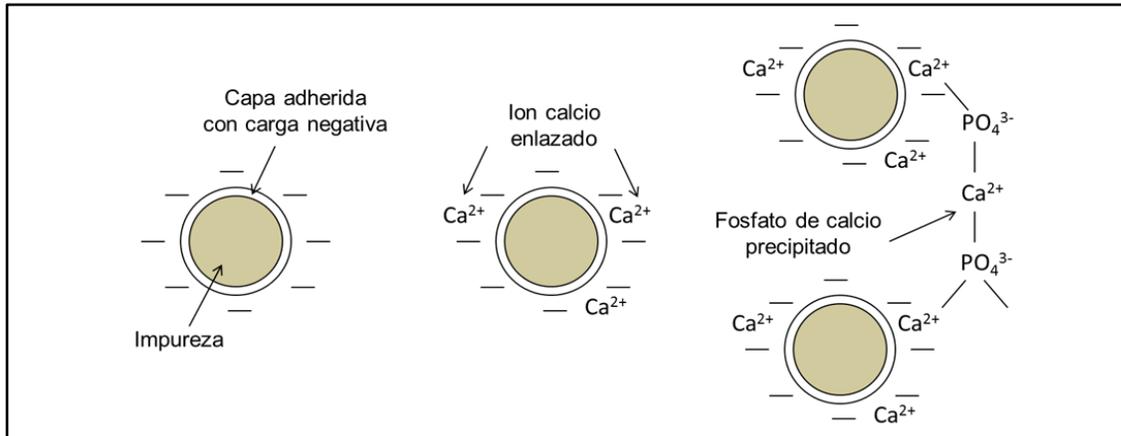
Para lograr una buena formación de flóculos hay que desestabilizar el sistema de sólidos en suspensión. Para ello, se neutralizan las cargas negativas de las partículas en el jugo adicionando ácido o SO_2 para disminuir el pH. Se puede desestabilizar el sistema mediante el calentamiento del jugo hasta ebullición, esto logra la desnaturalización de las proteínas en el jugo precipitándolas, además asegura la eliminación de aire disuelto en el jugo. Otra forma de desestabilizar el sistema es adicionar un compuesto que enlace estas partículas para precipitarlas. Esta es la base de la adición de floculante al jugo antes de ingresar a los clarificadores.

Para clarificar el jugo se adiciona lechada de cal para elevar el pH a 7. A este pH el contenido de fosfato natural en el jugo en forma de fosfatos de calcio. Los iones de calcio se ligan a la proteína adsorbida a las partículas. Estas partículas ligadas al calcio se enlazan con los fosfatos presentes en el jugo lo que permite la agrupación de partículas. "A esta primera agrupación de partículas se le llama floculación primaria."³³

³² PEÑARANDA, Jaime. Clarificación de jugo y meladura, filtración de lodos. p. 3.

³³ TATE & LYLE. TALO flocculants in sugar manufacture. p. 8.

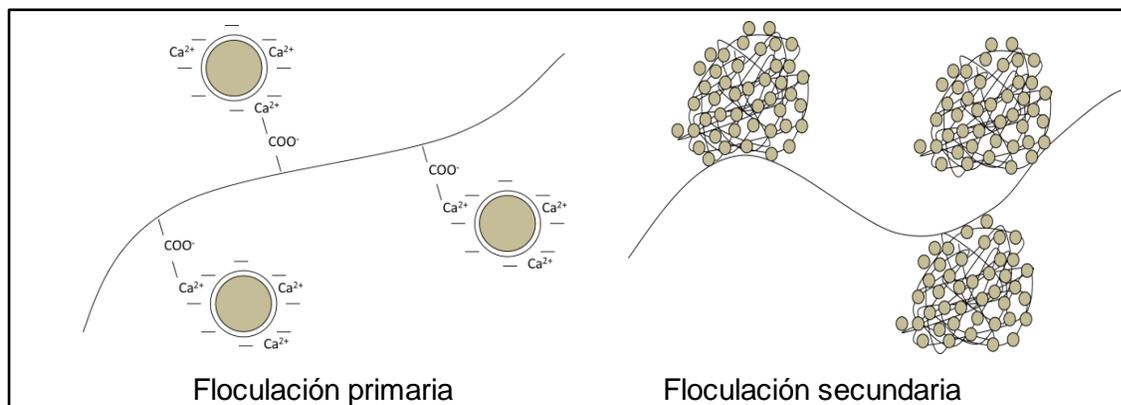
Figura 1. **Formación de fosfatos de calcio**



Fuente: BATULE, Eduardo. La clarificación del jugo de la caña y la meladura. p. 96.

Para coagular estas partículas se utiliza un floculante. Se ha experimentado con muchos polímeros naturales y sintéticos, siendo los polímeros lineales sintéticos a base de acrilato de sodio y acrilamida los de mayor aceptación.

Figura 2. **Formación de flóculos**



Fuente: TATE & LYLE. TALO flocculants in sugar manufacture. p. 8.

2.3.3. Factores agroindustriales que afectan la composición

“La composición de la cachaza varía de una fábrica a otra ya que está influida por los factores agroindustriales siguientes:”³⁴

- Variedad de la caña: el contenido de nitrógeno, fósforo y otros elementos depende de la variedad, así como, de la cantidad de materia cerosa.
- Tipo de cosecha: la cosecha de la caña de azúcar puede realizarse de forma mecanizada o por corte manual, además puede quemarse la caña antes del corte lo que aumenta el contenido de cenizas, materia orgánica y otros sedimentos que hacen variar la composición de la cachaza.
- Preparación de la caña: la preparación de la caña afecta en el contenido de tierra; algunos ingenios lavan la caña antes de entrar a los molinos, en Ingenio La Unión no se lava la caña antes de entrar a molienda.
- Temperatura del agua de imbibición: el agua utilizada en el proceso de extracción de sacarosa del bagazo generalmente se calienta y existe arrastre de materiales solubles y ceras con mayor facilidad a altas temperaturas.
- Factores climáticos: en períodos de lluvia es arrastrada una mayor cantidad de tierra, lo que aumenta la materia orgánica.
- Clarificación: las sustancias químicas utilizadas en la clarificación de los jugos determina la composición de los precipitados formados. Al utilizar cal, hay un mayor arrastre con los precipitados.

³⁴ MORALES, Erwin. Evaluación del efecto de la cachaza, nitrógeno y fósforo en caña de azúcar. p. 13-14.

- Bagacillo añadido: el bagacillo se añade para ayudar a la filtración de la cachaza.

2.4. Filtros de cachaza

La filtración en los procesos azucareros es de tipo “filtración por formación de torta”,³⁵ en la que el medio de filtración establece las características iniciales de la filtración, pero a medida que los sólidos se van acumulando sobre la superficie del filtro, es la torta que se va formando la que más influye en el proceso de filtración.

En la estación de filtros de cachaza en Ingenio La Unión S.A. se tienen dos tecnologías para el proceso de filtración: filtro banda y filtros rotativos continuos al vacío. El ingenio posee dos filtros banda y siete filtros rotativos continuos al vacío.

2.4.1. Filtros banda

“El filtro banda es semejante a un transportador de banda con un soporte transversal o de drenaje que lleva la tela filtrante y que también tiene la forma de una banda sinfín.”³⁶ La suspensión de cachaza ya floculada es alimentada al filtro sobre la superficie de la banda. Utilizando un conjunto de rociadores que están sobre la banda, se realiza una dispersión de agua caliente sobre la cachaza para lavarla. La cachaza pasa por un área de drenado por gravedad, una zona de drenado con vacío y antes de ser desechada pasa por una etapa de prensado.

³⁵ CHEN, James. Manual del azúcar de caña. p. 220.

³⁶ Technopulp. Filtro Vacuum Press para lodo. p. 6.

“El filtro banda de Ingenio La Unión tiene una capacidad equivalente a un filtro rotativo al vacío de 14' x 44', con capacidad para operar con una producción de 260 toneladas de torta por día, lo que equivale a una molienda de 8 000 toneladas de caña por día. Esta tecnología ofrece porcentajes de retención de sólidos insolubles por encima del 90% volumen/volumen.”³⁷

2.4.1.1. Descripción técnica del filtro

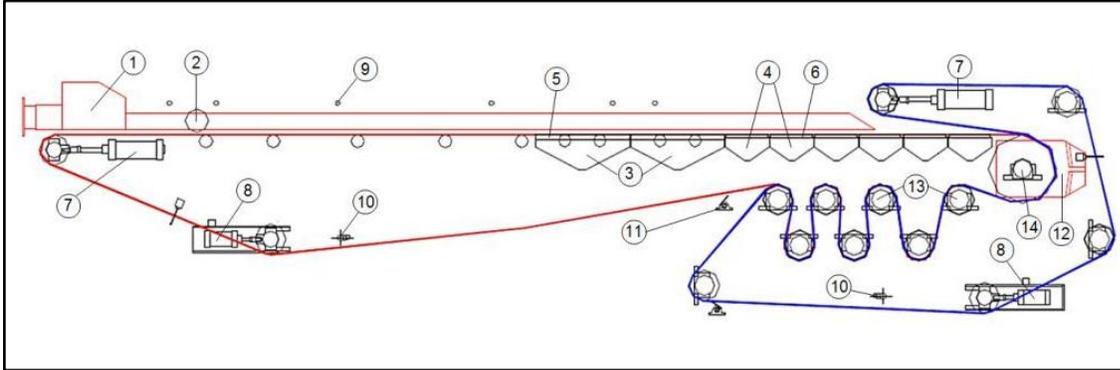
El filtro consta de un cuadro estructural en acero al carbón, montado sobre una estructura de soporte. La caja de alimentación de cachaza está construida en acero inoxidable, con sellos en poliéster. Tiene una mesa de drenaje con guarda lateral construida en acero inoxidable, con sellos en poliéster para mantener la cachaza sobre la mesa. Además, está equipada con un rodillo distribuidor de cachaza, con regulador de altura, construido en acero inoxidable.

El filtro tiene dos tipos de cajas de succión, cajas de succión primaria y cajas de succión secundaria. Las primeras están construidas en acero inoxidable equipadas con rodillos construidos en acero inoxidable para sostener la tela del filtro. Las cajas de succión secundaria también son de acero inoxidable pero están equipadas con placas de desgaste en polietileno de alta densidad a base de cerámica para sostener la tela y mantener la firmeza del área de vacío.

Para mantener la tela funcionando cuenta con tensores automáticos accionados por pistones neumáticos. Además, tiene guías automáticas neumáticas, formadas por válvulas y rodillo guía construidos en bronce. Los componentes del filtro banda se presentan en la tabla II y se ilustran en la figura 3.

³⁷ Technopulp. PC VPB 260. p. 2.

Figura 3. **Filtro banda de Technopulp**



Fuente: Technopulp. Filtro Vacuum Press para lodo. p. 15.

Tabla II. **Componentes del filtro banda**

No.	Componente
1	Caja de alimentación
2	Rodillo nivelador
3	Cajas de succión primaria
4	Cajas de succión secundaria
5	Placa de sello
6	Placa de desgaste
7	Tensores de telas
8	Guías automáticas de tela
9	Regaderas imbibición de torta
10	Regaderas limpieza de telas
11	Raspador de tela
12	Motorreductor de accionamiento
13	Rodillos conductores
14	Rodillo traccionador

Fuente: Technopulp. Filtro Vacuum Press para lodo. p. 15.

Para la limpieza de las telas se cuenta con regaderas para aspersión de agua construidas en acero inoxidable con boquillas autolimpiantes de bronce. Si la tela se desalinea se acciona un interruptor de parada completa que detiene el filtro antes de dañar la tela.

El filtro tiene cinco regaderas en acero inoxidable para aspersión de agua de imbibición sobre la cachaza, con 10 boquillas de bronce cada una. Las cajas que recolectan el jugo filtrado son de acero inoxidable y las cajas recolectoras de agua de limpieza son de acero inoxidable pero con tapa y colector.

“Los rodillos conductores son construidos en acero al carbón, revestido con elastómero. El rodillo de tracción es en acero inoxidable y tapas laterales en acero al carbón revestido. Ambos rodillos son con puntas de eje en acero refilado y las chumaceras con sello por retenedores.”³⁸

Tabla III. **Periféricos del filtro banda**

No.	Componente	No.	Componente
1	Filtro banda	11	Bomba centrífuga jugo filtrado
2	Tela filtrante	12	Tanque de sello de jugo filtrado
3	Inversor de frecuencia	13	Ciclón de bagacillo
4	Estructura de soporte	14	Tanque de cachaza primaria
5	Tolva de cachaza	15	Bomba helicoidal para cachaza
6	Separador de vacío	16	Mezclador estático
7	Ventilador de vacío	17	Bomba helicoidal para polímero
8	Tanque agua de limpieza de telas	18	Tanque polímero floculante
9	Filtro agua de limpieza de telas	19	Bomba lechada de cal
10	Bomba agua de limpieza de telas	20	Tanque lechada de cal

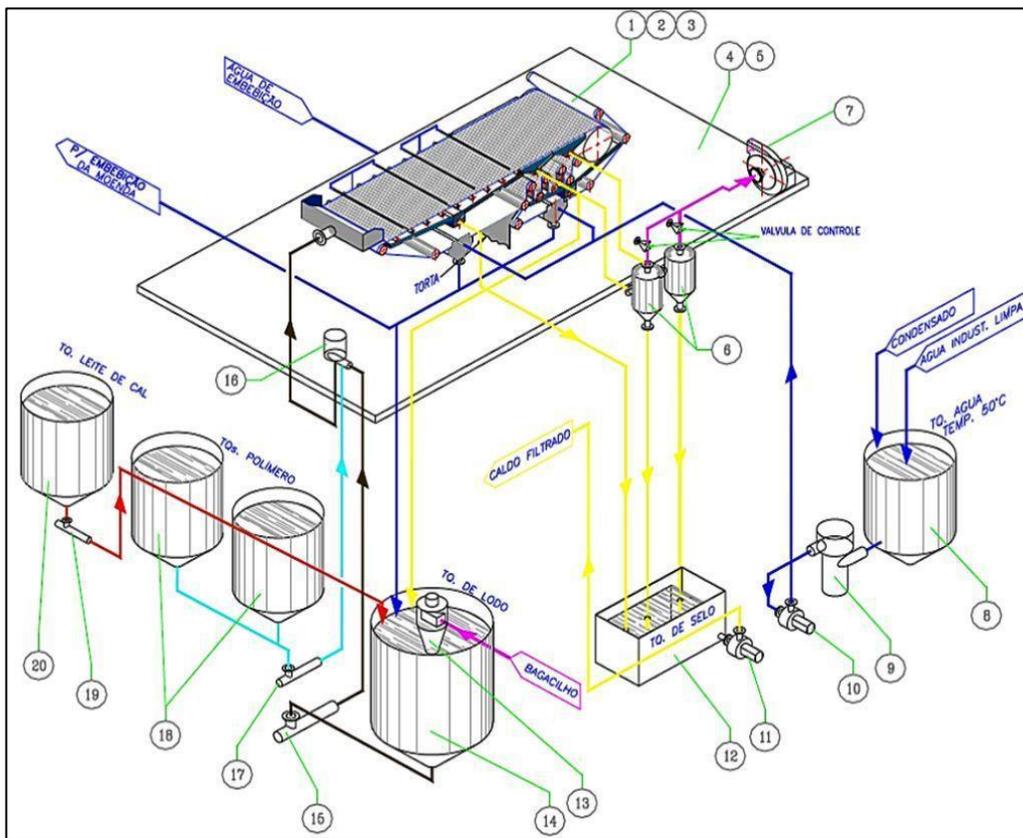
Fuente: Technopulp. PC VPB 260. p. 7.

³⁸ TECHNOPULP, Filtro Vacuum Press para lodo. p. 15.

2.4.1.2. Descripción de los periféricos

La instalación patrón de un filtro banda está compuesto por una serie de periféricos que permite que la filtración de la cachaza sea posible. Dentro de los periféricos se incluyen tanques, bombas y otros equipos. Estos periféricos se listan en la tabla III y se muestran en el diagrama de operación del filtro banda, figura 4.

Figura 4. Diagrama de flujo de la operación del filtro banda



Fuente: Technopulp. PC VPB 260. p. 6.

2.4.1.3. Operación del filtro banda

La preparación de la cachaza es muy importante antes de enviarla al filtro. La cachaza de los clarificadores es enviada para el tanque pulmón (cachazón) donde se le adiciona bagacillo. Antes de ser enviada para el filtro, la cachaza requiere, dependiendo de las características físico-químicas, corrección de pH. Para ello se adiciona lechada de cal en el cachazón.

Después de corregir el pH, el lodo es enviado para el filtro. En la línea de lodo se agrega polímero floculante, antes de los mezcladores estáticos. La cachaza con bagacillo, lechada de cal y polímero floculante es homogenizado en los mezcladores estáticos y continúa hacia la caja de alimentación del filtro.

Es importante mantener algunos puntos en la tubería de lodo para predilución. Estos puntos pueden ser en el mezclador estático, en el tanque pulmón y en la tubería. "El filtro puede ser alimentado con concentraciones entre 30 a 35% volumen/volumen de sólidos."³⁹ La predilución se puede hacer utilizando parte del agua residual de la limpieza de la tela filtrante.

"La cachaza preparada y diluida es enviada al filtro. El filtro banda es semejante a un transportador de banda sinfín, como se mencionó anteriormente y es accionada por un conjunto de rodillos. La suspensión de cachaza floculada, se vierte en la zona de alimentación y pasa por un rodillo nivelador para conseguir una distribución homogénea sobre toda la superficie de la banda. Se realiza una serie de lavados a la cachaza con cinco regaderas con agua caliente ubicadas sobre la tela."⁴⁰ Esta agua, llamada de imbibición, ayuda a extraer la sacarosa presente en la cachaza.

³⁹ Technopulp. Filtro Vacuum Press para lodo, DP. p. 1.

⁴⁰ Ibíd. PC VPB 260. p. 3.

Tabla IV. **Parámetros de operación del filtro banda**

DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	UNIDADES
FILTRO VP260		
Capacidad equivalente -Base 25 kg torta/TC	10 400	TMCD
Capacidad equivalente -Base 30 kg torta/TC	8 700	TMCD
Capacidad equivalente -Base 35 kg torta/TC	7 400	TMCD
Capacidad equivalente -Base 40 kg torta/TC	6 500	TMCD
Eficiencia de retención de impurezas	90-94	% V/V
Presión neumática	5	kgf/cm ²
ALIMENTACIÓN DE CACHAZA		
Flujo nominal	38	m ³ /h
Concentración de impureza de cachaza	> 45	% V/V
Presión de alimentación	2	kgf/cm ²
Adición de bagacillo	1 - 2	kg/TMC
Brix de lodo	≤ 14	° Bx
pH de lodo	7,5 - 8	U pH
AGUA DE IMBIBICIÓN		
Flujo nominal	25	m ³ /h
Temperatura	60 - 80	°C
Presión	1	kgf/cm ²
Filtro de protección	40	mesh
FLOCULANTE		
Consumo	3 - 5	ppm/caña
Concentración de solución	0,075 – 0,1	% P/V
Presión de aplicación	4	bar
AGUA DE LIMPIEZA DE TELAS		
Flujo nominal	15 -18	m ³ /h
Presión	12	kgf/cm ²
Filtro de protección	40	mesh
TORTA PRODUCIDA		
Cantidad	≤ 260	TM/día
Humedad	65 - 68	%
Pol residual (libre de pol del bagacillo)	1,2 – 1,6	%

Fuente: Technopulp. PC VPB 260. p. 2.

“La cachaza pasa por tres etapas de separación en el filtro. La primera separación se realiza por gravedad, donde 60-70% del jugo filtrado drena por gravedad a través de la banda. Este jugo contiene una baja concentración de sólidos insolubles (1% V/V).”⁴¹ En la segunda etapa, la banda con la cachaza se moviliza hacia la zona de vacío. La zona de vacío consiste en una serie de cámaras transversales, las primeras dos con vacío alto y las restantes con vacío bajo. Después de la zona de vacío la banda se desliza hacia el conjunto de rodillos que presan la torta de cachaza. Durante el prensado se efectúa la última fase de separación líquido sólido.

Al final del prensado la torta de cachaza filtrada, lavada y prensada se descarga hacia la banda de cachaza. El jugo obtenido de estas tres etapas es recolectado en un tanque, para su envío al tanque de jugo alcalinizado en el área de clarificación.

2.4.2. Filtro rotativo continuo al vacío

El filtro rotativo continuo al vacío es el de mayor uso en la filtración de cachaza de los ingenios azucareros. Los filtros rotativos continuos al vacío para filtrar cachaza fueron diseñados por Oliver-Campbell y descritos por Tromp (1936), pero en la actualidad existen mucho más grandes y eficientes que en esa época.

2.4.2.1. Descripción del filtro rotativo

El filtro está compuesto de un tambor hueco, sumergido en la cachaza a filtrar que rota por medio de un eje horizontal. Su periferia sirve como área filtrante y está dividida en 24 secciones independientes.

⁴¹ Technopulp. Filtro Vacuum Press para lodo, DP. p. 2.

Cada una de estas secciones está conectada individualmente al sistema de vacío que consta de tres sectores diferentes. Un sector conectado a la atmósfera, uno comunicando a una cámara de vacío bajo y otro conectado a una cámara de vacío alto. “La superficie exterior del tambor consiste de lámina de acero inoxidable con 116 perforaciones por centímetro cuadrado de 0,5 milímetros de diámetro.”⁴²

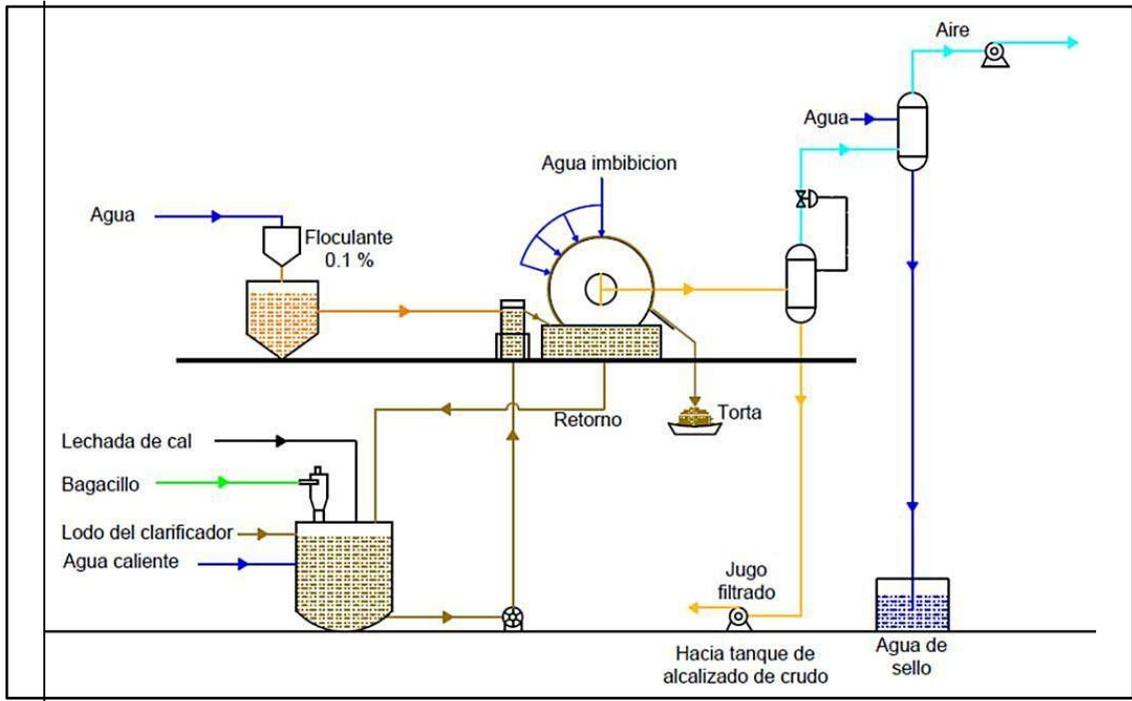
La bandeja que contiene la cachaza tiene un agitador para evitar que la cachaza sedimente en el fondo. Además esta bandeja tiene un rebalse de cachaza que es enviada nuevamente al tanque pulmón, creando una recirculación de cachaza aumentando la actividad microbiológica. Esto ocasiona pérdidas por inversión de sacarosa por acción microbiológica.

2.4.2.2. Operación del filtro rotativo

A medida que el tambor del filtro rota, la cachaza es succionada por el tambor formando una capa sobre su superficie. Luego pasa por una serie de rociadores de agua caliente (70 grados Celsius), durante esta etapa se lava la torta de cachaza para extraer el jugo y sacarosa que contiene. Continúa la etapa de secado donde el jugo es succionado por el vacío. La torta se desprende del tambor por medio de un raspador y se rompe el vacío, dejando caer la torta de cachaza sobre la banda transportadora y comenzando el ciclo de nuevo.

⁴² REIN, Peter. Sugar cane engineering. p. 255.

Figura 5. Filtro rotativo continuo al vacío



Fuente: REIN, Peter. Cane sugar engineering. p. 253.

3. METODOLOGÍA

3.1. Variables

Ingenio La Unión cuenta con instrumentos de medición electrónicos instalados en la línea de producción de azúcar, los cuales permiten medir variables críticas del proceso. Con estas mediciones se regula o monitorea una variable del proceso. Las variables que son medidas en tiempo real en el filtro banda son:

- Flujo (gpm): se realizan dos mediciones de flujo, el flujo de cachaza que ingresa en el filtro y el flujo de agua de imbibición de la torta sobre el filtro.
- Nivel (%): se mide el nivel en los tanques de jugo filtrado y el nivel de los tanques que contienen la cachaza.
- Vacío (pulg Hg): se mide en el filtro banda. El filtro tiene dos áreas de vacío, vacío bajo y vacío alto; que es generado por un ventilador de vacío.
- Velocidad (%): se mide la velocidad de la tela filtrante y el ventilador de vacío.
- Floculante (ppm): se mide el floculante aplicado a la cachaza antes de entrar al filtro. Las partes por millón son con base a sólidos.

Tabla V. **Variables en la operación del filtro banda**

No.	VARIABLE	DIMENSIÓN	TIPO DE VARIABLE	FACTOR POTENCIAL		FACTOR PERTURBADOR	
				Constante	Variable	Controlable	No Controlable
1	Flujo de cachaza	gpm	Dependiente		X	X	
2	Flujo de agua	gpm	Dependiente		X	X	
3	Velocidad ventilador	%	Dependiente		X	X	
4	Velocidad de tela filtrante	%	Dependiente		X	X	
5	Floculante aplicado	ppm	Dependiente		X	X	
6	Polarización (pol)	%	Independiente		X		X
7	Brix	°Bx	Independiente		X	X	
8	Potencial de hidrógeno	pH	Independiente		X	X	
9	Nivel tanque de cachaza	%	Control		X	X	
10	Nivel de tanque de jugo filtrado	%	Control		X	X	
11	Vacío	pulg Hg	Control		X		X
12	Temperatura	°F	Control		X	X	
13	Presión Manométrica	Psig	Control	X		X	

Fuente: elaboración propia.

Además, se miden otras variables constantemente para mantener el control del proceso y lograr una buena filtración:

- Temperatura (°F): se mide la temperatura de la cachaza, agua de imbibición, agua de lavado de tela, jugo filtrado y agua de preparación de floculante.

- Potencial de hidrógeno (pH): se mide el pH del jugo filtrado y del agua con que se prepara el floculante.
- Presión manométrica (psig): se mide la presión que requiere el filtro para su funcionamiento.
- Polarización (%): se mide el porcentaje de pol de la cachaza constantemente para conocer la cantidad de sacarosa que contiene.
- Brix (°Bx): se mide la cantidad de sólidos base seca de la cachaza.

Para realizar la primera parte de la investigación donde se evalúa y se mejora el funcionamiento del filtro banda, se tomaron a consideración las variables que se presentan en la tabla V.

3.2. Delimitación del campo de estudio

El estudio de evaluar y optimizar el funcionamiento del filtro banda es un estudio de tipo cuantitativo ya que evalúa el efecto que tienen las modificaciones realizadas en el funcionamiento del filtro banda, así como, en el pol de la cachaza y la calidad de jugo filtrado.

Los cuatro aspectos importantes en el funcionamiento del filtro que influye de gran manera en el resultado de la filtración son:

- El manejo del filtro banda
- La instalación de los periféricos
- La preparación de la cachaza
- El floculante utilizado

El universo del estudio es el filtro banda y sus periféricos en la estación de filtros de cachaza del área de clarificación del proceso de Tratamiento de Jugo de Ingenio La Unión S.A.

3.3. Recurso humano

- Investigador: Amílcar Eduardo Ayala
- Asesora: Inga. Claudia María Barrientos
- Operador de filtros
- Analista de laboratorio

3.4. Recurso físico

Los recursos físicos son proporcionados por Ingenio La Unión S.A. ya sea en la fábrica o en el laboratorio de fábrica. En la fábrica se tiene al filtro banda con sus periféricos y en el laboratorio se tienen los equipos, la cristalería y los reactivos.

3.4.1. Equipo y cristalería

El laboratorio de fábrica cuenta con varios equipos y cristalería para realizar ensayos a los distintos materiales del proceso de fabricación de azúcar. La tabla VI muestra los equipos y cristalería del laboratorio de fábrica utilizados en la fase experimental.

Tabla VI. **Equipo y cristalería utilizada en la fase experimental**

EQUIPO	CRISTALERÍA	
Descripción	Descripción	Características
1. Polarímetro	1. Termómetro	· De -10 °C a 140 °C
2. Refractómetro	2. Beakers	· 100, 250 ml
3. Centrífuga	3. Pipeta Volumétrica	· 1, 5, 10, 25, 100 ml
4. Potenciómetro	4. Balón Kohlrausch	· 250 ml
5. Agitador magnético	5. Probetas	· 100, 1000 ml
6. Balanza analítica	6. Tubos para centrífuga	· 15 ml
7. Cronómetro	7. Erlenmeyer	· 250 ml
8. <i>Jar-Test</i>	8. Varillas de Agitación	· Plástico
9. Muffa	9. Picetas	· Plástico
10. Bomba de vacío	10. Frasco de muestra	· Plástico
	11. Embudo Buschner	· Porcelana
	12. Kitasato	· 250 ml

Fuente: elaboración propia.

3.4.2. Reactivos

El laboratorio de fábrica cuenta con los reactivos utilizados en los ensayos a las muestras de los materiales del proceso de fabricación de azúcar. La tabla VII muestra los reactivos utilizados en los ensayos realizados a la cachaza.

Tabla VII. **Reactivos utilizados en la fase experimental**

REACTIVO	ESPECIFICACIONES
Subacetato de plomo ($\text{Pb}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot \text{Pb}(\text{OH})_2$)	De conformidad con la especificación ICUMSA y molida hasta pasar por un tamiz de 0,42 mm
Floculante	Polímero de acrilamida y acrilato de sodio fuertemente aniónico de medo o alto peso molecular
Hidróxido de Sodio (NaOH)	Concentración 0,1 N
Ácido Clorhídrico (HCl)	Concentración 0,1 N
Agar nutritivo	Kit de cultivo microbiológico

Fuente: elaboración propia.

3.5. Técnica de investigación

La técnica de investigación es cuantitativa de tipo analítica ya que permite examinar los datos de forma numérica y establece comparación de las variables al tratar de probar o negar una hipótesis.

3.6. Recolección y ordenamiento de la información

Debido a la naturaleza de la experimentación se tienen variables que cuantifican características de la muestra y otras que son manipuladas en la operación de los equipos. La información será obtenida de mediciones de instrumentos y serán organizadas en tablas para su ordenamiento.

En el caso de las variables que cuantifican una característica de una muestra como el pH o el pol, se midieron con instrumentos de laboratorio. Para ello se recolectaron muestras en la estación de filtros de cachaza y se llevaron al laboratorio para su análisis.

3.7. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información

Toda la información que se recolectó en la investigación se tabuló en tablas para ordenar los datos. Las tablas se elaboraron para diferentes ensayos con diferentes variables. Este ordenamiento facilitó el procesamiento de datos y el análisis que se realizó en cada ensayo de esta investigación.

Se tabularon los datos obtenidos en los distintos ensayos realizados en esta investigación. Estas tablas se encuentran en los apéndices.

3.8. Análisis estadístico

En la realización del diseño de investigación y en la experimentación se utilizó un diseño en bloques con tratamientos (variables dependientes) y resultados (variables independientes). El análisis estadístico para esta etapa se basó en el análisis de la variable dependiente y de las variables independientes, en un análisis de comparación simple. De acuerdo a los resultados estos se clasificaron o se graficaron para conocer tendencias. Para el procesamiento de datos se realizaron varias lecturas o mediciones y se tomaron como medida respectiva el promedio de estas, con el objetivo de mejorar la precisión de los datos medidos. El diseño de investigación comprobó una hipótesis a través de una comparación simple aleatoria.

3.9. Plan de análisis de los resultados

Para esta investigación se realizó un estudio detallado de la literatura referente al tema, de igual manera se realizaron pruebas, ensayos, calibraciones y ajustes de instrumentos y se obtuvo información de análisis (por ejemplo: curvas de pol, pH, etcétera), rangos de operación y condiciones operativas.

3.9.1. Métodos y modelos

Para el análisis de los datos obtenidos de las pruebas se utilizó la media aritmética, determinación de error, varianza y la desviación estándar. Para el análisis de las muestras se utilizaron los métodos establecidos por la Comisión Internacional de Métodos Uniformes para el Análisis del Azúcar

3.9.1.1. Determinación de la media aritmética

Para obtener un análisis de datos se utilizó la media aritmética para determinar el valor promedio en diferentes rangos de operación, a partir de estos valores se realizó el análisis completo de los resultados.

La media aritmética de un conjunto finito de números, es igual a la suma de todos sus valores dividida entre el número de sumandos.

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n a_i}{n} = \frac{a_1 + \dots + a_n}{n} \quad \text{Ecuación 1}$$

3.9.1.2. Determinación de error

Para un mejor análisis de resultados se realizó un análisis de dispersión de datos; ya que las medidas de dispersión permiten retratar la distancia de los valores de la variable a un cierto valor central y permiten identificar la concentración de los datos en un cierto sector del recorrido de la variable.

La precisión se utiliza para describir qué tan semejantes son los resultados con los otros obtenidos exactamente en la misma forma y en las mismas condiciones. Para describir la precisión de un conjunto de datos repetidos se puede utilizar la varianza y la desviación estándar.

3.9.1.3. Varianza

La varianza permite identificar la diferencia promedio que hay entre cada uno de los valores respecto a su media. Este promedio es calculado, elevando cada una de las diferencias al cuadrado y calculando su media; y dividiendo este resultado por el número de observaciones que se tengan.

Se debe tener en cuenta que la varianza puede ser influenciada por los valores atípicos y no se aconseja su uso cuando las distribuciones de las variables aleatorias tienen colas pesadas.

$$s^2 = \frac{\sum(x_i - \bar{X})^2}{n - 1} \quad \text{Ecuación 2}$$

3.9.1.4. Desviación estándar

Esta medida permite determinar el promedio aritmético de fluctuación de los datos respecto a la media. La desviación estándar da como resultado un valor numérico que presenta el promedio de diferencia que hay entre los datos y la media. Para calcular la desviación estándar basta con hallar la raíz cuadrada de la varianza.

$$s = \frac{\sum(x_i - \bar{X})^2}{n - 1} = \sqrt{s^2} \quad \text{Ecuación 3}$$

3.9.1.5. Métodos ICUMSA

Para el análisis de las muestras se utilizaron los métodos establecidos por la Comisión Internacional de Métodos Uniformes para el Análisis del Azúcar (ICUMSA por sus siglas en inglés), que es un organismo internacional de normalización, que publica procedimientos detallados de laboratorio para el análisis de azúcar.

El libro de métodos ICUMSA contiene instrucciones detalladas para analizar jugos de caña, azúcar cruda y blanca, remolacha, melaza, entre otros. En este libro se encuentran los métodos para la determinación del contenido de sólidos secos por polarimetría, densimetría y refractometría, color, azúcares reductores y la presencia de metales como el arsénico, entre otros.

3.9.2. Programas a utilizar para analizar los datos

El programa que se utilizó para realizar cálculos y analizar los datos obtenidos de los ensayos fue Microsoft Excel 2010®, que es un software que facilita la tabulación y análisis de datos, así como, la representación de los resultados en gráficos individuales o comparativos.

3.10. Procedimiento experimental

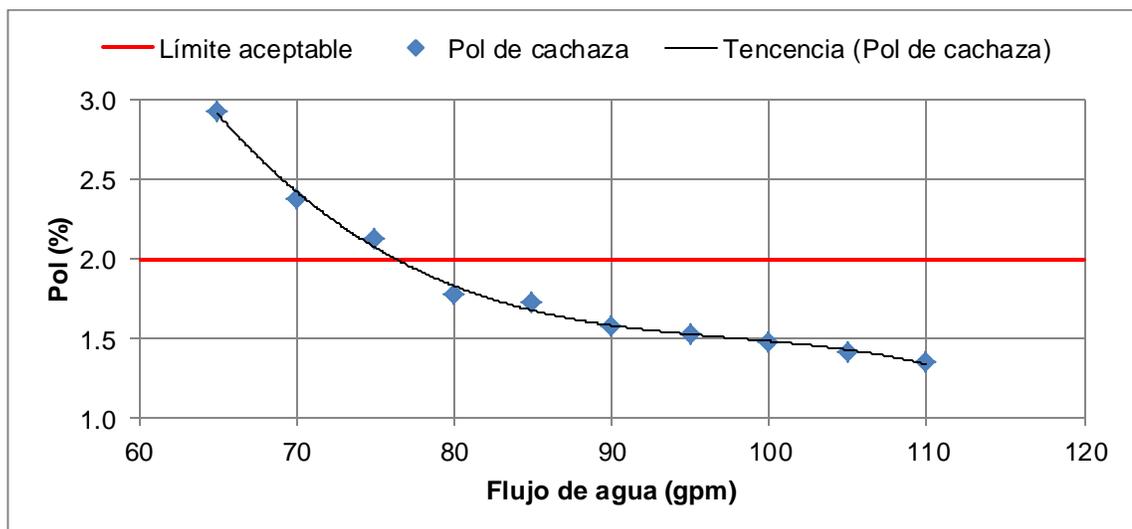
- Se inició el filtro a evaluar.
- Se fijaron los set de operación, flujo de cachaza, flujo de agua de imbibición, dosificación de floculante, velocidad de la tela filtrante y velocidad del ventilador de vacío.
- Se esperaron 15 minutos para que estabilizara la operación del filtro.
- Se anotaron las lecturas de las variables mencionadas en el inciso 2.
- Se tomaron muestras de cachaza o jugo filtrado saliendo del filtro.
- Se analizaron las muestras tomadas en el laboratorio de la fábrica.
- Se modificó el set de operación de la variable a analizar.
- Se repitió del paso 2 al 6 según el diseño experimental.
- Se tabularon y analizaron los datos obtenidos.

4. RESULTADOS

4.1. Análisis del pol de cachaza

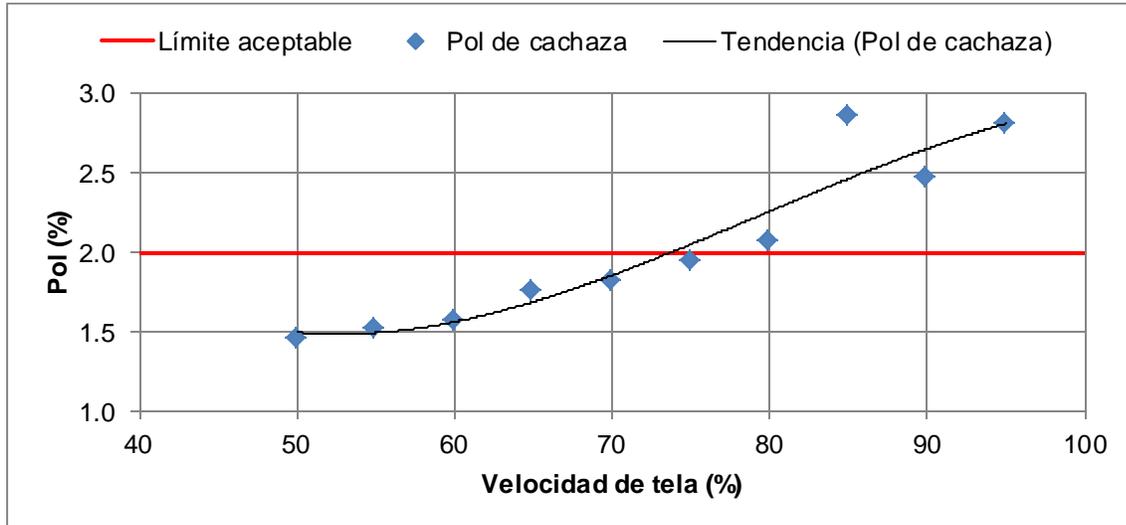
Se realizaron una serie de ensayos utilizando máximos y mínimos de las variables y analizando el pol de cachaza obtenido a estas condiciones, con el método ICUMSA. Conociendo las tendencias presentadas se realizó otra serie de ensayos para cada una de las cuatro variables a manipular manteniendo el flujo de cachaza constante. Además, se analizó el pol de cachaza monitoreando el pH y la cantidad de agua de dilución. A continuación se presentan los resultados:

Figura 6. Pol de cachaza variando el flujo de agua de imbibición



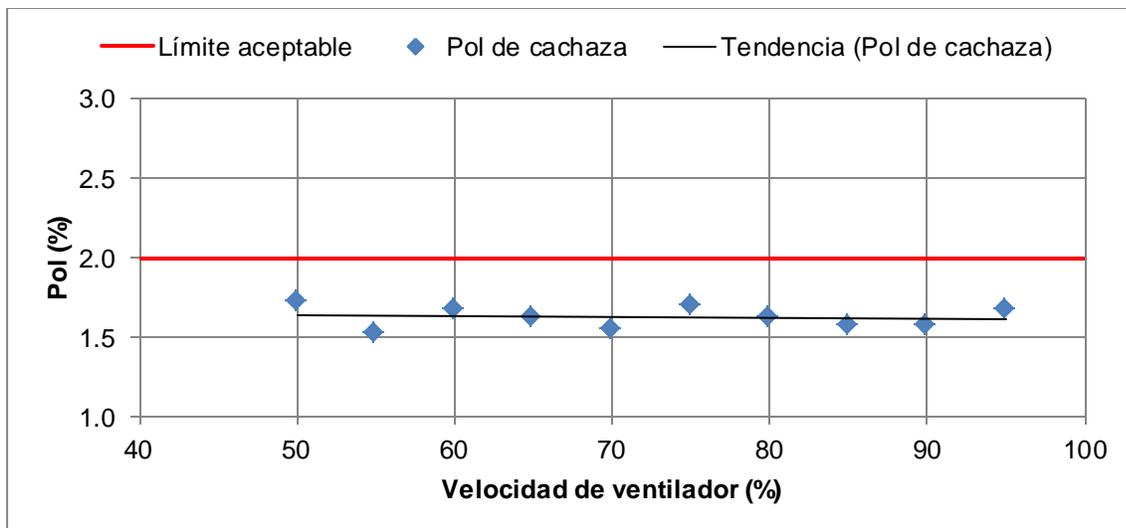
Fuente: elaboración propia.

Figura 7. **Pol de cachaza variando la velocidad de la tela filtrante**



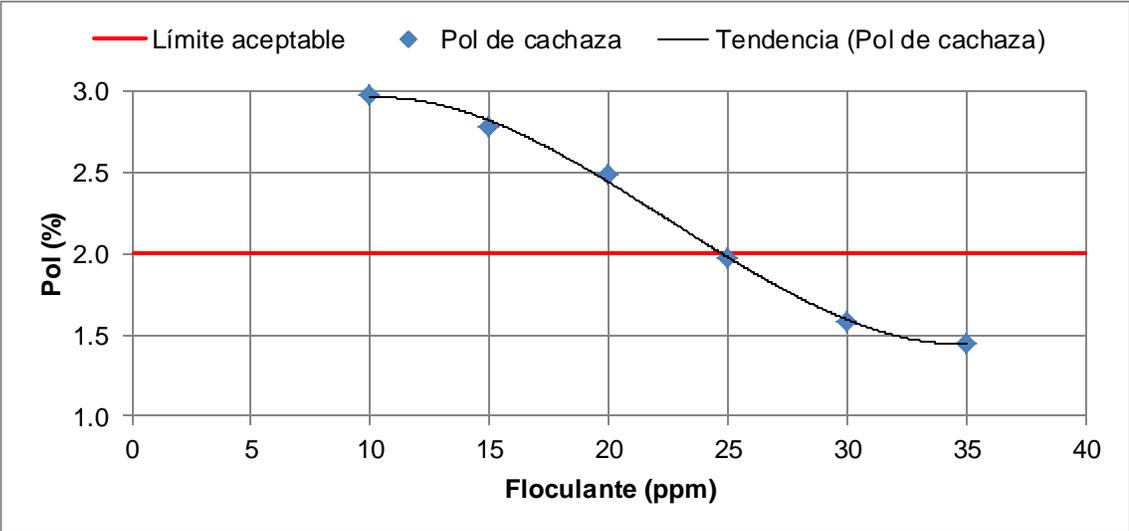
Fuente: elaboración propia.

Figura 8. **Pol de cachaza variando la velocidad del ventilador de vacío**



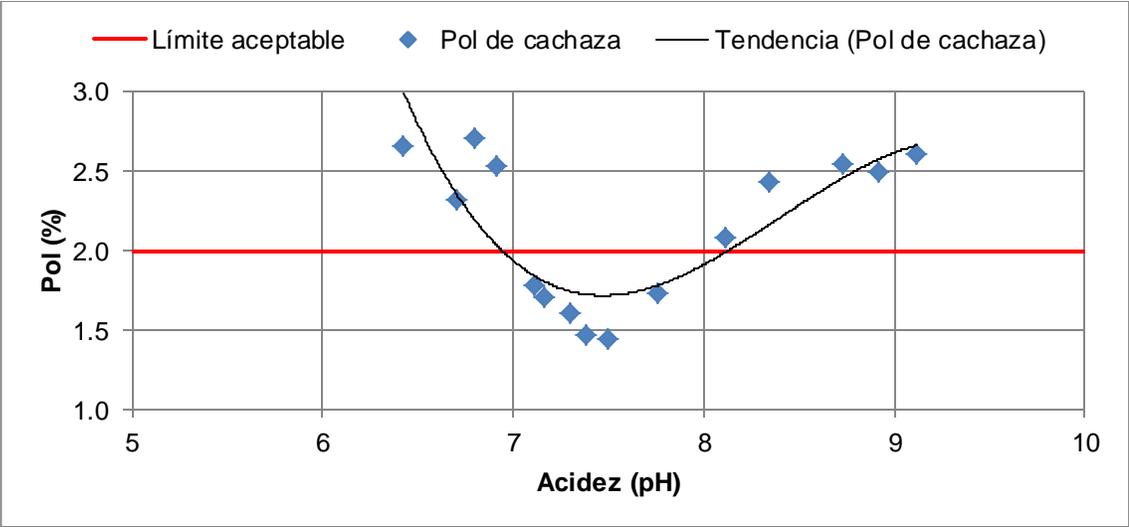
Fuente: elaboración propia.

Figura 9. Pol de cachaza variando la dosis de floculante aplicado



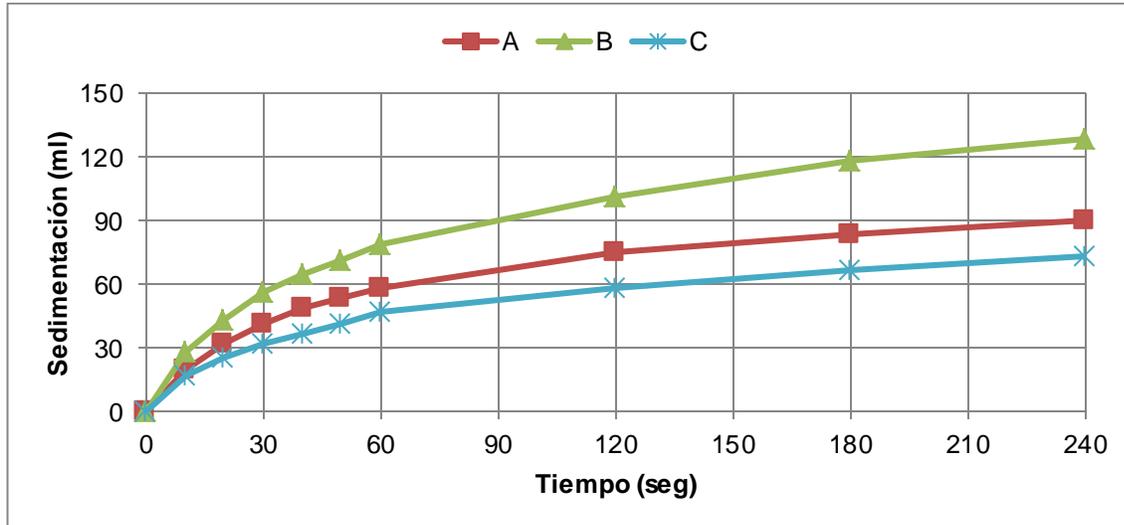
Fuente: elaboración propia.

Figura 10. Pol de cachaza obtenido monitoreando el pH de la cachaza



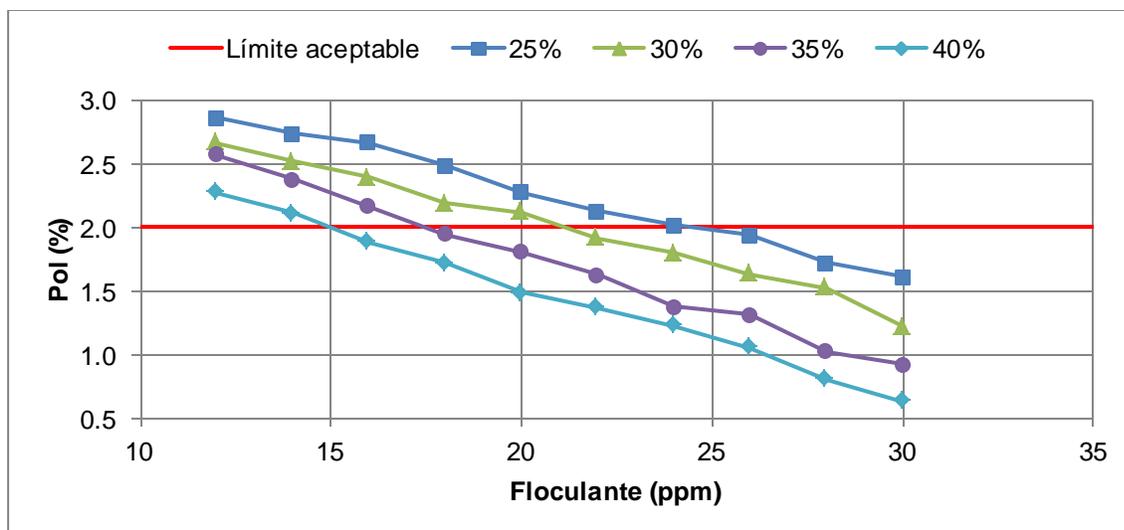
Fuente: elaboración propia.

Figura 11. **Curvas de sedimentación de diferentes floculantes**



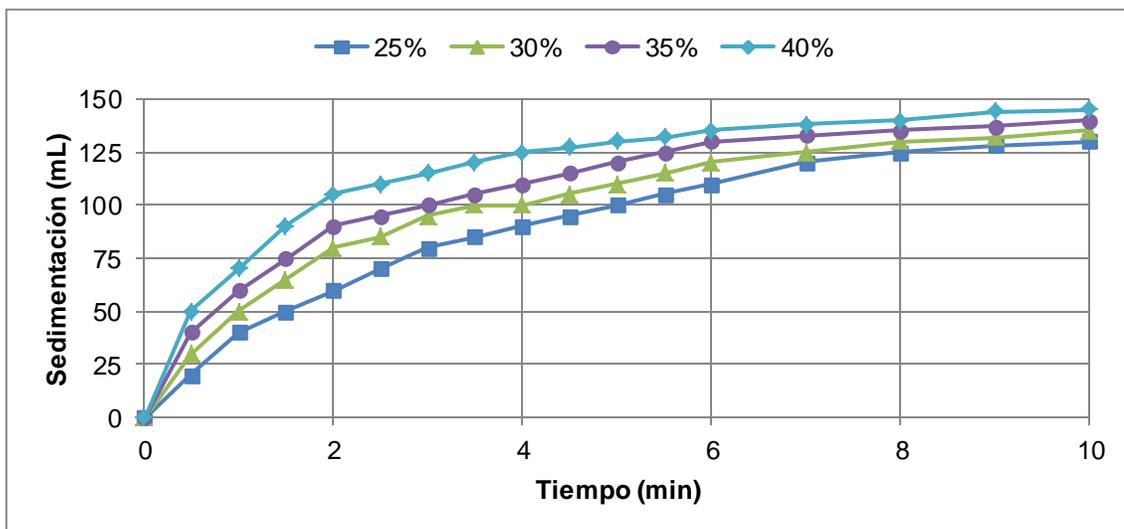
Fuente: elaboración propia.

Figura 12. **Pol de cachaza obtenido diluyendo la cachaza alimentada**



Fuente: elaboración propia.

Figura 13. **Velocidad de sedimentación de la cachaza**



Fuente: elaboración propia.

4.2. Análisis de jugo filtrado

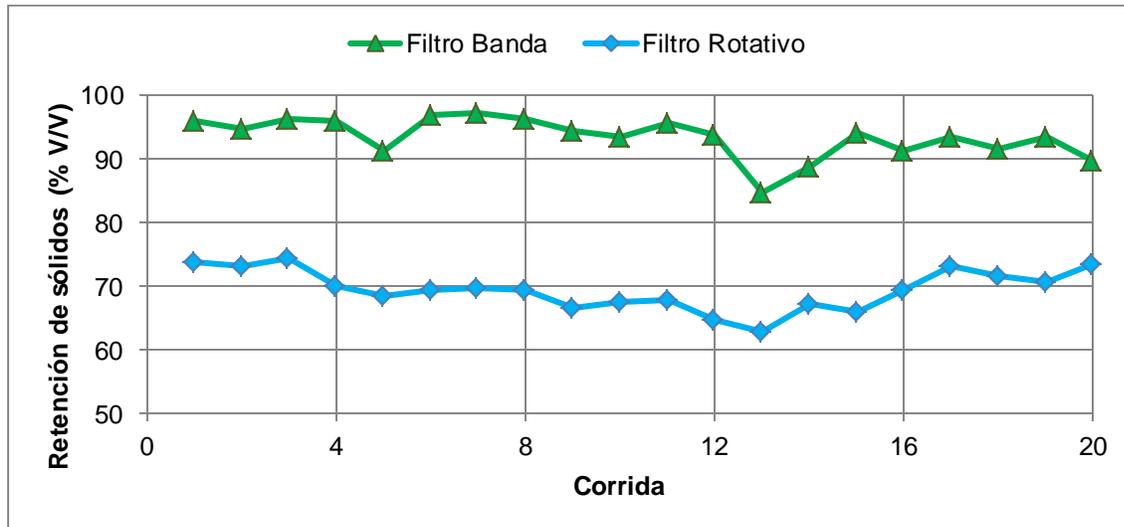
Se realizó una comparación entre el jugo filtrado obtenido del filtro banda y el jugo del filtro rotativo, se calculó el porcentaje de retención de sólidos de los filtros y, se realizó un análisis microbiológico del jugo filtrado obtenido con cada tecnología. A continuación se presentan los resultados:

Tabla VIII. **Porcentaje de retención de sólidos de los filtros de cachaza**

Filtro	Retención (% V/V)
Banda	93,5
Rotativo	69,5

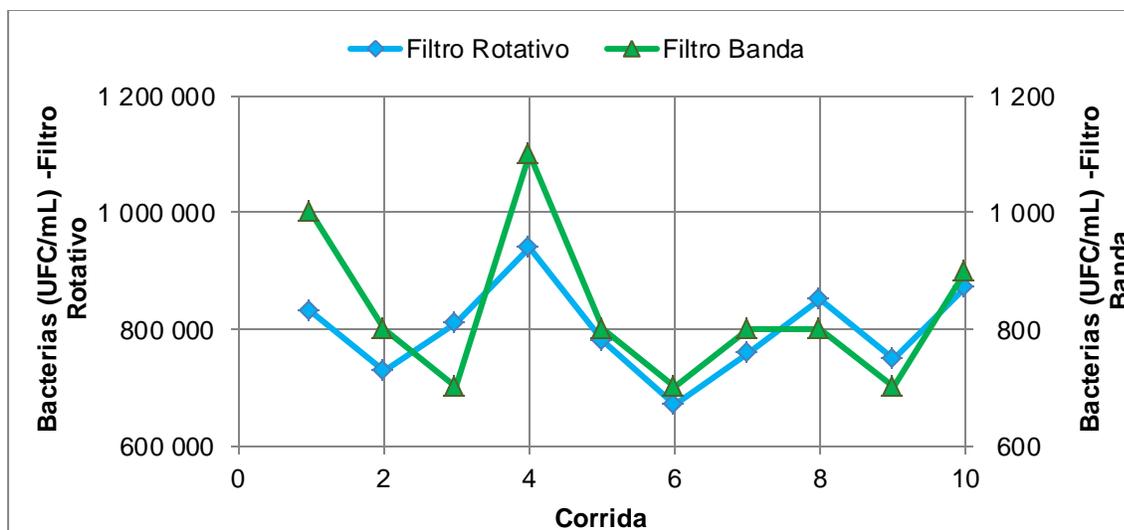
Fuente: elaboración propia.

Figura 14. **Porcentaje de retención de sólidos de los filtros de cachaza**



Fuente: elaboración propia.

Figura 15. **Bacterias en jugo filtrado**



Fuente: elaboración propia.

Tabla IX. **Microbiología de jugo filtrado**

Filtro	Bacterias (unidades formadoras de colonias /mL)	Levaduras (+ / -)	Mohos (+ / -)
Banda	830	-	-
Rotativo	799 000	+++	+

Fuente: elaboración propia.

4.3. **Zafra 2011-2012**

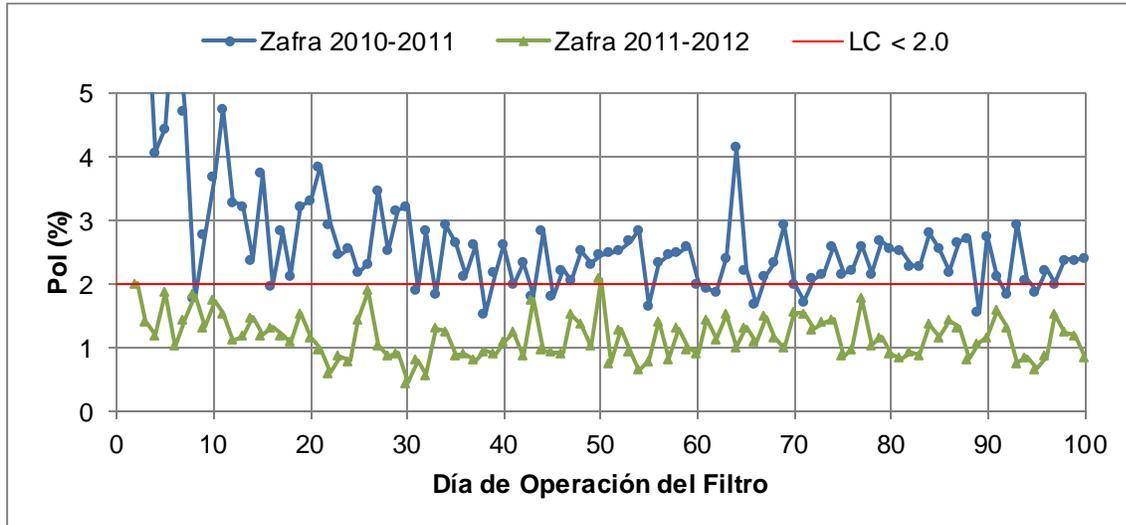
Después de realizar los ensayos mencionados se modificaron algunos parámetros para la Zafra 2011-2012 en busca de mejorar la operación y comparar los resultados obtenidos con la zafra anterior. A continuación se presentan los resultados obtenidos:

Tabla X. **Análisis de los datos de pol de cachaza de dos zafras**

Zafra	Pol (%)	Varianza	Desviación Estándar
2010-2011	2,63	1,25	1,12
2011-2012	1,17	0,25	0,50

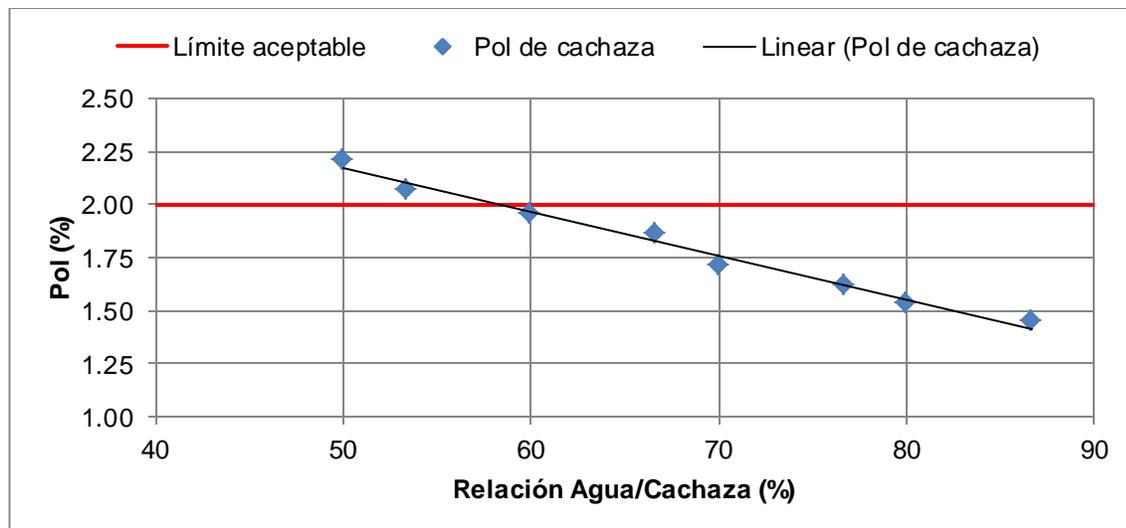
Fuente: elaboración propia.

Figura 16. **Pol de cachaza promedio por día del filtro banda**



Fuente: elaboración propia.

Figura 17. **Pol de cachaza promedio por agua aplicada a la cachaza**



Fuente: elaboración propia.

5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

“Durante la zafra 2010-2011 inició operaciones un filtro banda para cachaza en Ingenio La Unión. Este filtro, de tecnología brasileña, tiene una capacidad nominal para filtrar 160 galones por minuto de cachaza con 110 galones por minuto de agua de imbibición y obtener un pol menor a 2%”⁴³. El filtro banda durante sus primeros días de funcionamiento trabajó con un flujo de cachaza menor al 50% y un pol de cachaza mayor a 2%. Para obtener un pol menor al 2% se realizaron varios análisis de las variables que afectan el funcionamiento del filtro y por consiguiente afectan el pol de la cachaza.

Las variables que se manipularon al momento de operar el filtro fueron el flujo de cachaza, flujo de agua, adición de floculante, velocidad de la tela filtrante y la velocidad del ventilador de vacío. Para conocer tendencias se realizaron una serie de ensayos utilizando máximos y mínimos de estas variables y analizando el pol de la cachaza obtenido a estas condiciones. Las situaciones en el ensayo que obtuvieron un pol de cachaza bajo, fueron un flujo de agua máximo, la velocidad de la tela al mínimo, la velocidad del ventilador máximo y el floculante adicionado máximo.

Un indicador visual del buen funcionamiento del filtro fue cuando la torta de cachaza despega por completo de la tela al momento de desechar la cachaza, ya que resultaron datos de pol más bajos. Conociendo las tendencias presentadas se realizó otra serie de ensayos para cada una de las cuatro variables a manipular manteniendo el flujo de cachaza constante.

⁴³ Technopulp. PC VPB 260. p. 2.

De la figura 6 se puede observar que a mayor flujo de agua, menor es el pol obtenido; y que a 80 galones por minuto de agua, se obtienen datos de pol menor a 2. La figura 7 muestra que a menor velocidad de la banda del filtro menor pol de cachaza. Durante la operación del filtro se debe mantener la menor velocidad posible siempre y cuando las condiciones de cachaza en clarificadores y la calidad de la cachaza lo permitan. En cuanto a la velocidad del ventilador del vacío no se encontró ninguna relación en cuanto al pol de cachaza obtenido, figura 8. El rango de operación del floculante se determinó entre 25 - 30 partes por millón (base sólidos) ya que se obtienen datos de pol debajo de 2 y si se aumenta a 35 partes por millón los costos de operación aumentan de manera significativa. Esto se observa en la figura 9.

Después de determinar el rango de operación el estudio se enfocó en la preparación de la cachaza. “El control de pH es muy importante para mantener la filtrabilidad de la cachaza.”⁴⁴ Por esta razón se decidió agregar lechada de cal al cachazón y controlar el pH. Como se puede observar en la figura 10 el pol de la cachaza obtenido es menor cuando el pH del jugo filtrado se encuentra en un rango entre 7 y 8. Estas corridas se realizaron buscando una relación entre el flujo de agua y de cachaza del 80%.

Según Technopulp, en el caso de la operación de filtros banda, es importante mantener algunos puntos, ubicados en los mezcladores estáticos y en la descarga de la bomba de alimentación de cachaza, para la predilución del lodo. La predilución se debe hacer antes del punto de aplicación del polímero, en el caso de la estación de filtros en la descarga de la bomba que alimenta al filtro banda. Por tanto, la cachaza a este filtro debe ser alimentado con entre 30 a 40% volumen/volumen de agua de dilución.

⁴⁴ REIN, Peter. Cane sugar engineering. p. 249.

En la figura 11 se presentan tres curvas de sedimentación de tres tipos de floculantes aplicados en la cachaza. Se observa que el floculante B tiene una mayor velocidad de sedimentación, además presentó una cachaza más compacta y consistente; por lo que se escogió para ser utilizado en la operación del filtro.

Cuando la velocidad de sedimentación es mayor, el efecto en la disminución del pol de cachaza es mayor, figura 12. A partir de que se empezó a realizar la dilución con agua en los filtros banda, existió una disminución en el pol. En la figura 13 se presenta el efecto de la dilución en la velocidad de sedimentación, en la separación del jugo filtrado y la cachaza. Se puede observar que a mayor cantidad de agua de predilución, mayor la separación.

Como parte de la evaluación del jugo filtrado se calculó el porcentaje de retención de sólidos de los filtros banda y los filtros rotativos. Además se realizó un análisis microbiológico del jugo filtrado obtenido con cada tecnología. El filtro banda tiene mayor porcentaje de retención de sólidos, figura 14, lo que indica que el jugo filtrado lleva menos sólidos de regreso a clarificación. El análisis microbiológico indicó que el jugo filtrado del filtro banda no presentaba mohos ni levaduras y las bacterias presentes eran 962 veces menor a las del filtro rotativo. El jugo obtenido del filtro rotativo presentaba leve cantidad de mohos y alta concentración de levaduras.

La figura 16 presenta los resultados del pol de cachaza por día del filtro banda en los primeros cien días de operación de las zafras 2010-2011 y 2011-2012. Durante este período, en la primera zafra de operaciones el filtro obtuvo un pol de 2,63% estando por encima de lo requerido.

En este período el filtro trabajó con una relación de agua-cachaza de 100%, sin agua dilución, de 20-30 partes por millón de floculante adicionado, 65-80% velocidad de la tela filtrante, 80-100% el ventilador de vacío y un pH entre 6,5-7,5.

Se realizaron los ensayos anteriormente mencionados y se modificaron algunos parámetros para la siguiente zafra en busca de mejorar la operación. El pol obtenido en los cien días de la zafra 2011-20112 fue de 1,17%. En esta segunda zafra la desviación estándar y la varianza fueron menores a la de la zafra anterior; esto indica que los datos tuvieron menor dispersión. La operación del filtro en este período fue con una relación de agua-cachaza de 80-85%, 30-35% volumen/volumen de dilución, de 15-20 partes por millón de floculante adicionado, 65-75% velocidad de la tela filtrante, 100% el ventilador de vacío y un pH entre 7 y 8. Se logró una reducción en el pol del 55% respecto a la zafra anterior para el mismo tiempo.

La cantidad de agua que se aplica a la torta de cachaza para extraer la sacarosa afecta la evaporación ya que el agua adicionada debe ser evaporada. Esto se debe a que el jugo filtrado obtenido se envía hacia el tanque de jugo alcalizado de la línea de crudo. Para optimizar el agua utilizada por el filtro se desarrolló un ensayo para conocer la relación de agua-cachaza utilizada que obtenga un pol de cachaza debajo de 2. En la figura 17 se observa que a una relación de 60% se obtiene un pol menor a 2 y con una relación del 55% ya se está por encima de este valor.

CONCLUSIONES

1. Se recuperó una mayor cantidad de sacarosa respecto a la zafra anterior al disminuir el pol de la cachaza a menos de 2%. Esto fue posible después de realizar la calificación del funcionamiento del filtro banda de cachaza de Ingenio La Unión S.A., a través de un estudio de las variables que influyen en el pol de la cachaza obtenida del filtro.
2. Se mejoró la operación del filtro banda y se obtuvo una reducción en el pol del 55% respecto a la zafra anterior para el mismo tiempo evaluado.
3. La preparación de cachaza, que está formada por la adición de floculante, lechada de cal, agua de lavado y predilución en el caso de los filtros banda, es importante para garantizar la formación correcta de flóculos en la entrada del filtro de cachaza y permitir que el jugo rico en sacarosa sea filtrado.
4. La predilución en los filtros banda es una variable que debe ser controlada, ya que ayuda a que la velocidad de sedimentación de la cachaza sea mayor y produce un efecto positivo en la disminución del pol de cachaza.
5. Las condiciones de operación del filtro con que se obtiene un pol menor a 2% son una relación de agua-cachaza de 60-75%, 30-35% volumen/volumen de dilución, de 15-20 partes por millón de floculante adicionado, 65-75% velocidad de la tela filtrante, 100% el ventilador de vacío y un pH de cachaza entre 7 y 8.

6. El filtro banda tiene 24% más retención de sólidos que el filtro rotativo al vacío, por ende el jugo filtrado regresa con menos sólidos a clarificación evitando la recirculación de los mismos.

7. El jugo filtrado del filtro banda, presenta una contaminación microbiológica 962 veces menor al jugo filtrado de los filtros rotativos al vacío, obteniendo una menor pérdida de azúcar por inversión microbiológica.

RECOMENDACIONES

1. Cada ingenio debe realizar una investigación propia, ya que la composición de la cachaza se ve afectada por varios factores agroindustriales como; la variedad de caña, el tipo de corte de caña, la forma de limpieza de caña, químicos utilizados en la clarificación, etcétera; evaluando las variables de operación de los filtros de cachaza tomando como base el presente trabajo.
2. Se debe realizar un balance energético del agua que se adiciona al proceso de tratamiento de jugo, teniendo en cuenta que el agua que se adiciona a los filtros de cachaza retorna a la fábrica y tiene un consumo energético al ser evaporada.

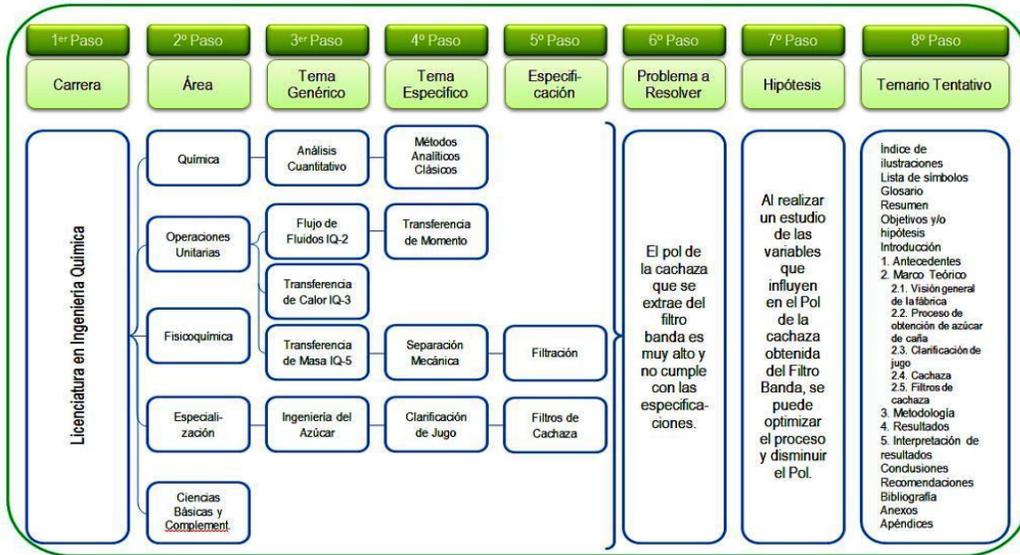
BIBLIOGRAFÍA

1. Asociación de Azucareros de Guatemala, (ASAZGUA). [en línea] www.azucar.com.gt. [Consulta: 8 de agosto de 2011.]
2. ———. *Cuadro 28: Comparativo de Producción Zafra 2009-2010 y Zafra 2010-2011*. Guatemala: ASAZGUA, 2012. 8 p.
3. BATULE, Eduardo. *El Filtro de Cachaza*. 1a Edición. San Salvador: LESASA, 1998. 71 p.
4. ———. *La Clarificación del Jugo de la Caña y la Meladura*. 2a Edición. San Salvador: LESASA, 2005. 281 p.
5. CHEN, James C. P. *Manual del Azúcar de Caña*. 2a Edición. México: LIMUSA, 1985. 1 200 p.
6. Consultores de Ingenios Azucareros S.A. (CIASA). *Estudio de Ampliación para Moler 18,000 T.C.D. Produciendo Azúcar Cristal y Crudo con Planta Térmica y Cogeneración, Ingenio La Unión*. Guatemala: CIASA, 2007. 40 p.
7. HONIG, Pieter. *Principios de Tecnología Azucarera*. Vol. I. New York: CECSA, 1953. 645 p.
8. HUGOT, E. *Handbook of Cane Sugar*. New York: Elsevier Science Publisher, 1986. 1 166 p.

9. Ingenio La Unión S.A. *Centro Documental. Producción de Edulcorantes.* Guatemala, 2012. 166 p.
10. ———. *Reporte de Laboratorio de Fabricación. Zafras 2010-2012.* Guatemala, 2012. 147 p.
11. International Sugar Organization (ISO). *World Sugar Balance.* USA: ISO, 2010. 31 p.
12. MORALES, Erwin. *Evaluación del efecto de cachaza, nitrógeno y fósforo en caña de azúcar; en el conjunto de suelos Tanquintín, finca Pantaleón, Siquinalá, Escuintla.* Trabajo de graduación de Ing. Agrónomo. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Agronomía, 1999. 49 p.
13. PEÑARANDA, Jaime. *Clarificación de Jugo y Meladura, Filtración de Lodos.* 1a Edición. Colombia: LIMUSA, 2008. 179 p.
14. REIN, Peter. *Cane Sugar Engineering.* Berlin: Bartens KG, 2007. 768 p.
15. Tate & Lyle Enterprises Ltd. *TALO Flocculants In Sugar Manufacture.* Inglaterra: TLE, 1975. 27 p.
16. Technopulp Industrial. *Filtro Vacuum Press para Lodo, Serie VP.* Riberao Preto Brasil: TPISA, 2010. 29 p.
17. VAN DER POEL, P. W., SCHWECK, H. Y SCHATZ, T. *Sugar Technology.* Berlin: Bartens KG, 1998. 1 115 p.

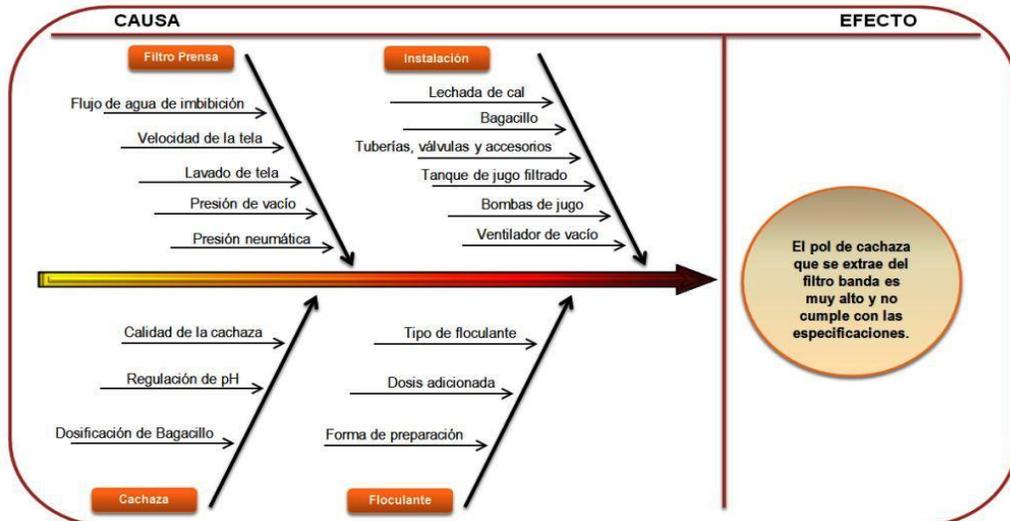
APÉNDICES

Apéndice 1. Requisitos Académicos



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. Diagrama de Ishikawa



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 3. **Pol de cachaza obtenido utilizando máximos y mínimos**

No.	Flujo de cachaza (gpm)	Flujo de agua (gpm)	Velocidad de tela (%)	Velocidad de ventilador (%)	Floculante (ppm)	Pol de cachaza (%)
1	100	50	60	50	20	-
2	100	50	60	50	30	4,82
3	100	50	60	90	20	-
4	100	50	60	90	30	6,67
5	100	50	90	50	20	6,50
6	100	50	90	50	30	6,79
7	100	50	90	90	20	7,41
8	100	50	90	90	30	6,18
9	100	100	60	50	20	-
10	100	100	60	50	30	-
11	100	100	60	90	20	-
12	100	100	60	90	30	-
13	100	100	90	50	20	-
14	100	100	90	50	30	3,87
15	100	100	90	90	20	-
16	100	100	90	90	30	2,78

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 4. **Pol de cachaza obtenido variando flujo de agua**

No.	Flujo de cachaza (gpm)	Flujo de agua (gpm)	Velocidad de tela (%)	Velocidad de ventilador (%)	Floculante (ppm)	Pol de cachaza (%)
1	100	65	60	90	30	2,93
2	100	70	60	90	30	2,37
3	100	75	60	90	30	2,12
4	100	80	60	90	30	1,77
5	100	85	60	90	30	1,73
6	100	90	60	90	30	1,58
7	100	95	60	90	30	1,52
8	100	100	60	90	30	1,48
9	100	105	60	90	30	1,41
10	100	110	60	90	30	1,35

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 5. **Pol de cachaza obtenido variando la velocidad de tela**

No.	Flujo de cachaza (gpm)	Flujo de agua (gpm)	Velocidad de tela (%)	Velocidad de ventilador (%)	Floculante (ppm)	Pol de cachaza (%)
1	100	90	50	90	30	1,46
2	100	90	55	90	30	1,53
3	100	90	60	90	30	1,58
4	100	90	65	90	30	1,76
5	100	90	70	90	30	1,82
6	100	90	75	90	30	1,95
7	100	90	80	90	30	2,07
8	100	90	85	90	30	2,86
9	100	90	90	90	30	2,48
10	100	90	95	90	30	2,81

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 6. **Pol de cachaza obtenido variando la velocidad del ventilador**

No.	Flujo de cachaza (gpm)	Flujo de agua (gpm)	Velocidad de tela (%)	Velocidad de ventilador (%)	Floculante (ppm)	Pol de cachaza (%)
1	100	90	60	50	30	1,72
2	100	90	60	55	30	1,53
3	100	90	60	60	30	1,67
4	100	90	60	65	30	1,62
5	100	90	60	70	30	1,55
6	100	90	60	75	30	1,70
7	100	90	60	80	30	1,62
8	100	90	60	85	30	1,57
9	100	90	60	90	30	1,58
10	100	90	60	95	30	1,68

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 7. **Pol de cachaza obtenido variando la adición de floculante**

No.	Flujo de cachaza (gpm)	Flujo de agua (gpm)	Velocidad de tela (%)	Velocidad de ventilador (%)	Floculante (ppm)	Pol de cachaza (%)
1	100	90	60	90	10	2,97
2	100	90	60	90	15	2,78
3	100	90	60	90	20	2,48
4	100	90	60	90	25	1,97
5	100	90	60	90	30	1,58
6	100	90	60	90	35	1,45

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 8. **Pol de cachaza obtenido midiendo pH**

No.	Flujo de cachaza (gpm)	Flujo de agua (gpm)	Velocidad de tela (%)	Velocidad de ventilador (%)	Floculante (ppm)	pH jugo filtrado (pH)	Pol de cachaza (%)
1	107	86	70	95	28	6,43	2,65
2	115	92	70	95	30	6,71	2,31
3	104	83	70	95	30	6,80	2,70
4	109	86	70	95	30	6,92	2,52
5	104	85	70	95	28	7,11	1,77
6	132	107	70	95	30	7,17	1,70
7	131	104	70	95	30	7,30	1,60
8	109	90	70	95	28	7,39	1,46
9	150	115	70	95	30	7,50	1,44
10	125	100	70	95	28	7,76	1,72
11	118	94	70	95	28	8,12	2,08
12	124	99	70	95	28	8,35	2,42
13	105	81	70	95	28	8,73	2,54
14	110	88	70	95	30	8,92	2,49
15	125	100	70	95	28	9,12	2,60

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 9. **Pol de cachaza con 25% de dilución de agua de imbibición**

No.	Flujo de cachaza (gpm)	Flujo de agua (gpm)	Velocidad de tela (%)	Velocidad de ventilador (%)	Floculante (ppm)	pH jugo filtrado (pH)	Pol de cachaza (%)
1	125	101	65	95	30	7,38	1,61
2	127	102	65	95	28	7,26	1,72
3	125	100	65	95	26	7,78	1,94
4	124	100	65	95	24	7,52	2,02
5	126	101	65	95	22	7,39	2,13
6	126	100	65	95	20	7,48	2,28
7	125	101	65	95	18	7,54	2,49
8	125	99	65	95	16	7,57	2,67
9	124	99	65	95	14	7,63	2,74
10	127	101	65	95	12	7,71	2,86

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 10. **Pol de cachaza con 30% de dilución de agua de imbibición**

No.	Flujo de cachaza (gpm)	Flujo de agua (gpm)	Velocidad de tela (%)	Velocidad de ventilador (%)	Floculante (ppm)	pH jugo filtrado (pH)	Pol de cachaza (%)
1	124	99	65	95	30	7,58	1,22
2	125	101	65	95	28	7,16	1,53
3	126	101	65	95	26	7,53	1,64
4	124	100	65	95	24	7,81	1,80
5	126	101	65	95	22	7,36	1,92
6	124	100	65	95	20	7,68	2,12
7	125	100	65	95	18	7,56	2,19
8	125	99	65	95	16	7,39	2,39
9	124	99	65	95	14	7,85	2,52
10	127	101	65	95	12	7,28	2,67

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 11. **Pol de cachaza con 35% de dilución de agua de imbibición**

No.	Flujo de cachaza (gpm)	Flujo de agua (gpm)	Velocidad de tela (%)	Velocidad de ventilador (%)	Floculante (ppm)	pH jugo filtrado (pH)	Pol de cachaza (%)
1	124	100	65	95	30	7,70	0,93
2	125	101	65	95	28	7,79	1,03
3	126	101	65	95	26	7,85	1,32
4	125	100	65	95	24	7,54	1,38
5	125	100	65	95	22	7,12	1,63
6	124	99	65	95	20	7,77	1,81
7	127	101	65	95	18	7,33	1,95
8	126	101	65	95	16	7,82	2,17
9	125	100	65	95	14	7,77	2,38
10	124	100	65	95	12	7,50	2,57

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 12. **Pol de cachaza con 40% de dilución de agua de imbibición**

No.	Flujo de cachaza (gpm)	Flujo de agua (gpm)	Velocidad de tela (%)	Velocidad de ventilador (%)	Floculante (ppm)	pH jugo filtrado (pH)	Pol de cachaza (%)
1	125	101	65	95	30	7,21	0,64
2	125	100	65	95	28	7,33	0,81
3	124	99	65	95	26	7,15	1,06
4	126	101	65	95	24	7,23	1,23
5	126	100	65	95	22	7,21	1,37
6	124	100	65	95	20	7,42	1,49
7	125	101	65	95	18	7,32	1,72
8	124	100	65	95	16	7,34	1,89
9	127	101	65	95	14	7,24	2,11
10	126	101	65	95	12	7,09	2,28

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 13. **Porcentaje de retención de sólidos del filtro banda**

No.	Sólidos lodo	Sólidos jugo	Porcentaje de retención (% V/V)	No.	Sólidos lodo	Sólidos jugo	Porcentaje de retención (% V/V)
1	1,0	25	96,0	11	1,5	33	95,5
2	1,5	28	94,6	12	2,0	32	93,8
3	1,0	26	96,2	13	6,0	39	84,6
4	1,0	25	96,0	14	4,0	35	88,6
5	2,5	28	91,1	15	2,0	33	93,9
6	1,25	38	96,7	16	3,0	34	91,2
7	1,0	35	97,1	17	2,0	31	93,5
8	1,25	32	96,1	18	2,5	29	91,4
9	1,75	32	94,5	19	2,0	31	93,5
10	2,0	30	93,3	20	3,0	29	89,7

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 14. **Porcentaje de retención de sólidos del filtro rotativo**

No.	Sólidos jugo	Sólidos lodo	Porcentaje de retención (% V/V)	No.	Sólidos jugo	Sólidos lodo	Porcentaje de retención (% V/V)
1	12	46	73,9	11	17	53	67,9
2	11	41	73,2	12	19	54	64,8
3	13	51	74,5	13	19	51	62,7
4	12	40	70,0	14	16	49	67,3
5	16	51	68,6	15	17	50	66,0
6	15	49	69,4	16	15	49	69,4
7	13	43	69,8	17	14	52	73,1
8	15	49	69,4	18	15	53	71,7
9	18	54	66,7	19	15	51	70,6
10	15	46	67,4	20	13.5	51	73,5

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 15. **Microbiología de jugo filtrado del filtro banda**

No.	Bacterias (Unidades Formadoras de Colonias /mL)	Levaduras (+ / -)	Mohos (+ / -)
1	800	-	-
2	1 000	-	-
3	700	-	-
4	800	-	-
5	1 100	-	-
6	700	-	-
7	800	-	-
8	800	-	-
9	700	-	-
10	900	-	-

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 16. **Microbiología de jugo filtrado del filtro rotativo**

No.	Bacterias (Unidades Formadoras de Colonias /mL)	Levaduras (+ / -)	Mohos (+ / -)
1	830 000	++	+
2	730 000	++	+
3	810 000	++	+
4	940 000	+++	+
5	780 000	+++	+
6	670 000	++	+
7	760 000	+++	+
8	850 000	++	+
9	750 000	+++	+
10	870 000	+++	+

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 17. **Análisis de diferentes floculantes**

Tiempo (seg)	Sedimentación (ml)								
	Floculante A			Floculante B			Floculante C		
	1.1	1.2	1.3	2.1	2.2	2.3	3.1	3.2	3.3
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	5	30	25	15	40	30	10	30	10
20	10	50	35	30	60	40	15	40	20
30	15	65	45	40	80	50	20	50	25
40	20	75	50	45	95	55	25	55	30
50	25	80	55	50	105	60	30	60	35
60	30	85	60	55	115	65	35	65	40
120	40	105	80	65	155	85	50	75	50
180	45	115	90	75	185	95	55	85	60
240	50	125	95	80	200	105	60	95	65
Turb (FAU)	2 427	1 835	1 662	2 310	1 767	1 578	2 472	1 905	1 506
SST (mg/L)	1 643	1 350	1 280	1 632	1 269	1 221	1 692	1 371	1 110

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 18. **Velocidad de sedimentación de la cachaza a diferentes porcentajes de dilución**

Tiempo (minutos)	Dilución			
	25%	30%	35%	40%
	Volumen sedimentado (mL)			
0,0	1 000	1 000	1 000	1 000
0,5	980	970	960	950
1,0	960	950	940	930
1,5	950	935	925	910
2,0	940	920	910	895
2,5	930	915	905	890
3,0	920	905	900	885
3,5	915	900	895	880
4,0	910	900	890	875
4,5	905	895	885	873
5,0	900	890	880	870
5,5	895	885	875	868
6,0	890	880	870	865
7,0	880	875	867	862
8,0	875	870	865	860
9,0	872	868	863	856
10,0	870	865	860	855

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 19. Pol de cachaza del filtro banda

Día	Pol Zafra 10-11 (%)	Pol Zafra 11-12 (%)									
1	-	-	14	2,68	2,12	27	3,83	1,14	40	3,22	1,16
1	-	-	14	2,00	1,04	27	3,12	1,05	40	2,00	0,96
1	-	-	14	2,45	1,25	27	-	0,92	40	-	1,13
2	-	2,14	15	2,95	1,10	28	1,78	0,81	41	2,68	1,22
2	7,12	3,12	15	3,81	1,08	28	3,32	1,04	41	1,32	1,32
2	-	0,78	15	4,47	1,43	28	2,48	0,78	41	2,00	1,18
3	4,36	1,18	16	2,14	2,43	29	3,13	-	42	3,09	0,66
3	8,33	1,66	16	1,20	0,45	29	4,12	0,92	42	2,72	0,98
3	8,23	-	16	2,58	1,10	29	2,24	0,90	42	1,21	0,97
4	3,75	1,19	17	2,80	1,45	30	2,73	0,40	43	1,90	1,99
4	4,38	-	17	2,77	0,79	30	4,65	0,50	43	2,15	1,80
4	-	-	17	2,96	1,37	30	2,24	0,45	43	1,43	1,50
5	-	2,94	18	2,12	0,75	31	2,02	0,62	44	3,32	0,68
5	3,78	1,57	18	2,00	0,85	31	1,80	0,89	44	2,36	1,12
5	5,12	1,11	18	2,28	1,67	31	-	0,92	44	-	1,09
6	8,06	1,48	19	4,28	1,20	32	2,21	0,54	45	1,70	0,72
6	5,00	0,57	19	2,18	1,29	32	3,45	0,70	45	1,90	0,82
6	-	-	19	3,21	2,13	32	-	0,50	45	-	1,24
7	6,92	0,58	20	3,16	1,40	33	1,16	1,12	46	2,78	0,72
7	2,40	2,59	20	3,66	1,66	33	1,56	1,69	46	1,66	1,16
7	4,82	1,16	20	3,11	0,43	33	2,78	1,10	46	-	0,86
8	1,90	0,85	21	5,26	1,50	34	4,86	1,71	47	1,98	2,04
8	1,68	2,65	21	2,44	1,10	34	1,93	1,28	47	2,12	1,88
8	1,72	2,00	21	-	0,32	34	2,02	0,80	47	-	0,65
9	1,89	1,28	22	3,38	0,78	35	2,65	0,92	48	2,46	1,66
9	4,82	1,23	22	3,12	0,48	35	-	1,10	48	2,58	1,50
9	1,60	1,44	22	2,35	0,54	35	-	0,64	48	-	0,96
10	5,58	1,90	23	3,12	0,65	36	2,14	0,90	49	3,21	1,29
10	3,68	1,77	23	1,22	1,40	36	-	1,26	49	1,49	0,88
10	1,82	1,56	23	3,06	0,58	36	-	0,52	49	2,28	0,92
11	3,65	1,54	24	2,98	0,76	37	2,61	0,89	50	2,46	2,40
11	6,57	2,02	24	2,21	0,52	37	-	1,06	50	-	2,00
11	4,04	1,06	24	2,51	1,08	37	-	0,48	50	-	1,88
12	3,68	1,87	25	2,94	1,70	38	1,38	1,10	51	2,39	0,66
12	3,21	0,27	25	1,16	1,48	38	1,88	1,16	51	2,35	0,74
12	2,97	1,20	25	2,43	1,18	38	1,35	0,56	51	2,76	0,86
13	2,16	0,66	26	2,41	1,54	39	2,12	0,89	52	2,30	1,76
13	3,55	0,58	26	2,22	2,36	39	2,65	0,60	52	2,88	0,92
13	3,96	2,30	26	-	1,80	39	1,79	1,23	52	2,44	1,18

Continuación del apéndice 19.

Día	Pol Zafra 10-11 (%)	Pol Zafra 11-12 (%)	Día	Pol Zafra 10-11 (%)	Pol Zafra 11-12 (%)	Día	Pol Zafra 10-11 (%)	Pol Zafra 11-12 (%)	Día	Pol Zafra 10-11 (%)	Pol Zafra 11-12 (2%)
53	2,91	-	65	2,48	1,40	77	2,83	1,50	89	1,46	1,01
53	2,35	0,87	65	2,14	1,62	77	2,36	2,30	89	1,40	1,70
53	2,78	0,98	65	2,08	0,94	77	2,60	1,50	89	1,82	0,52
54	3,94	0,45	66	1,40	1,57	78	2,36	0,84	90	3,13	0,72
54	2,65	0,54	66	1,80	0,72	78	1,77	0,52	90	2,76	-
54	1,98	0,96	66	1,86	0,96	78	2,34	1,78	90	2,36	1,60
55	0,82	0,71	67	1,74	1,26	79	2,01	1,30	91	2,31	1,66
55	2,40	0,85	67	2,22	1,42	79	2,15	1,06	91	2,06	1,50
55	1,78	0,83	67	2,42	1,82	79	3,88	1,14	91	1,96	1,60
56	3,12	0,94	68	1,68	0,99	80	2,32	1,01	92	1,60	-
56	1,90	2,76	68	2,19	0,79	80	2,44	0,69	92	2,79	2,00
56	1,98	0,56	68	3,16	1,70	80	2,89	1,00	92	1,10	0,63
57	2,20	0,98	69	3,61	1,10	81	2,90	0,66	93	3,84	0,62
57	3,38	0,92	69	2,66	1,00	81	2,69	0,76	93	2,86	0,90
57	1,80	0,57	69	2,51	0,88	81	1,97	1,10	93	2,12	-
58	3,24	2,10	70	2,03	1,77	82	2,88	0,78	94	2,03	0,92
58	2,66	0,98	70	1,90	1,75	82	-	0,76	94	1,97	0,80
58	1,60	0,84	70	2,10	1,17	82	1,71	1,24	94	2,21	-
59	2,22	0,90	71	1,39	2,08	83	2,68	0,92	95	1,91	0,57
59	3,00	0,98	71	1,80	1,24	83	2,12	0,83	95	2,19	0,68
59	2,60	1,07	71	2,00	1,28	83	2,02	0,89	95	1,54	0,73
60	-	0,80	72	1,90	1,16	84	2,16	2,20	96	-	0,94
60	2,01	0,90	72	1,96	1,04	84	3,48	1,04	96	2,06	0,79
60	-	1,07	72	2,42	1,66	84	2,77	0,85	96	2,40	-
61	2,46	1,34	73	1,91	1,45	85	2,60	1,05	97	2,03	1,50
61	1,24	1,83	73	2,46	1,59	85	2,12	1,25	97	1,97	1,94
61	2,08	1,16	73	2,10	1,14	85	2,94	1,20	97	2,03	1,12
62	1,80	1,03	74	2,80	1,25	86	2,42	1,02	98	1,96	1,27
62	1,62	1,16	74	2,10	1,60	86	2,18	1,59	98	-	1,46
62	2,21	1,23	74	2,90	1,51	86	2,00	1,68	98	2,80	1,02
63	2,48	1,28	75	1,88	1,49	87	2,70	1,15	99	3,40	0,57
63	2,76	1,47	75	2,11	0,61	87	3,08	2,00	99	1,70	1,30
63	1,98	1,82	75	2,50	0,53	87	2,23	0,82	99	2,07	1,71
64	2,40	0,78	76	1,90	0,47	88	2,80	0,90	100	2,27	0,73
64	3,86	1,10	76	1,96	0,81	88	2,88	0,75	100	2,90	0,85
64	6,16	1,16	76	2,76	1,67	88	2,48	0,80	100	2,04	0,96

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 20. **Pol de cachaza variando la relación de agua-cachaza**

No.	Flujo de cachaza (gpm)	Flujo de agua (gpm)	Velocidad de tela (%)	Velocidad de ventilador (%)	Dosis de floculante (ppm)	Relación agua – cachaza (%)	Pol de cachaza (%)
1	150	130	70	100	15	87	1,45
2	150	120	70	100	15	80	1,53
3	150	115	70	100	15	77	1,62
4	150	105	70	100	15	70	1,71
5	150	100	70	100	15	67	1,86
6	150	90	70	100	15	60	1,96
7	150	80	70	100	15	53	2,07
8	150	75	70	100	15	50	2,21

Fuente: elaboración propia.