



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

**ESTIMACIÓN DE LAS PÉRDIDAS POR INVERSIÓN DE LA SACAROSA
EN LA ESTACIÓN DE EVAPORACIÓN A MÚLTIPLE EFECTO**

Gabriel Andrés Cifuentes Arguedas

Asesorado por el Dr. Ing. Adolfo Narciso Gramajo

Coasesorado por el Dr. Ing. Jaime Peñaranda Domínguez

Guatemala, octubre de 2013

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ESTIMACIÓN DE LAS PÉRDIDAS POR INVERSIÓN DE LA SACAROSA
EN LA ESTACIÓN DE EVAPORACIÓN A MÚLTIPLE EFECTO**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

GABRIEL ANDRÉS CIFUENTES ARGUEDAS

ASESORADO POR EL DR. ING. ADOLFO NARCISO GRAMAJO
COASESORADO POR EL DR. ING. JAIME PEÑARANDA DOMÍNGUEZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO

GUATEMALA, OCTUBRE DE 2013

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympto 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. Walter Rafael Véliz Muñoz
VOCAL V	Br. Sergio Alejandro Donis Soto
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Adolfo Narciso Gramajo Antonio
EXAMINADOR	Ing. Jorge Mario Estrada Asturias
EXAMINADOR	Ing. Víctor Herbert de León Morales
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:

ESTIMACIÓN DE LAS PÉRDIDAS POR INVERSIÓN DE LA SACAROSA EN LA ESTACIÓN DE EVAPORACIÓN A MÚLTIPLE EFECTO

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha 05 de julio de 2013.



Gabriel Andrés Cifuentes Arguedas

Guatemala, 17 de septiembre de 2013

Ingeniero
Victor Manuel Monzón Valdez
Director de Escuela de Ingeniería Química
Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero Monzón:

Por este medio le envío mi dictamen de aprobación del trabajo de graduación titulado: **“ESTIMACIÓN DE LAS PÉRDIDAS POR INVERSIÓN DE LA SACAROSA EN LA ESTACIÓN DE EVAPORACIÓN A MÚLTIPLE EFECTO”** realizado por **GABRIEL ANDRÉS CIFUENTES ARGUEDAS**, estudiante de la carrera de Ingeniería Química quien se identifica con carnet No. **200819145** y es asesorado por mi persona.

Sin otro particular y agradeciendo de antemano su fina atención a la presente, me suscribo de usted.

Atentamente,



Ing. Adolfo Narciso Gramajo Antonio

Colegiado 264

Asesor

Adolfo Gramajo
Ingeniero Químico
Colegiado 264



Guatemala, 23 de septiembre de 2013
Ref. EI.Q.TG-IF.061.2013

Ingeniero
Víctor Manuel Monzón Valdez
DIRECTOR
Escuela Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero Monzón:

Como consta en el Acta TG-076-2013-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: **Gabriel Andrés Cifuentes Arguedas.**

Identificado con número de carné: **2008-19145.**

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:

ESTIMACIÓN DE LAS PÉRDIDAS POR INVERSIÓN DE LA SACAROSA EN LA ESTACIÓN DE EVAPORACIÓN A MÚLTIPLE EFECTO

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por el Ingeniero Químico: **Adolfo Narciso Gramajo Antonio.**

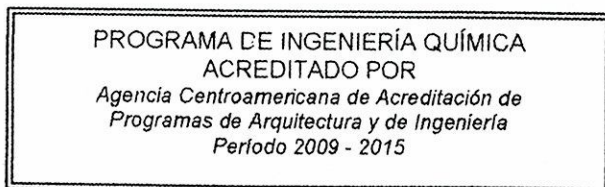
Habiendo encontrado el referido informe final del trabajo de graduación **SATISFACTORIO**, se autoriza al estudiante, proceder con los trámites requeridos de acuerdo a las normas y procedimientos establecidos por la Facultad para su autorización e impresión.

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"


Ing. Adela María Márroquín González
COORDINADORA DE TERNA
Tribunal de Revisión
Trabajo de Graduación



C.c.: archivo





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

Ref.EIQ.TG.285.2013

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, **GABRIEL ANDRÉS CIFUENTES ARGUEDAS** titulado: "**ESTIMACIÓN DE LAS PÉRDIDAS POR INVERSIÓN DE LA SACAROSA EN LA ESTACIÓN DE EVAPORACIÓN A MÚLTIPLE EFECTO**". Procede a la autorización del mismo, ya que reúne el rigor, la secuencia, la pertinencia y la coherencia metodológica requerida.


Ing. Víctor Manuel Monzón Valdez
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química



Guatemala, octubre 2013

Cc: Archivo
VMMV/ale

Universidad de San Carlos
de Guatemala

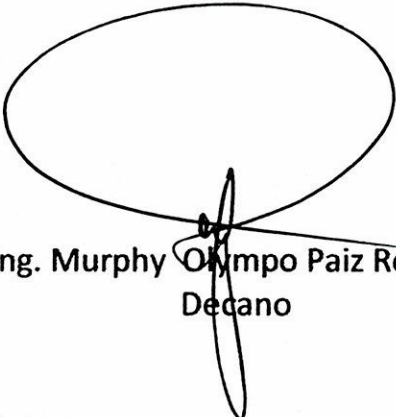


Facultad de Ingeniería
Decanato

DTG. 689 .2013

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: **ESTIMACIÓN DE LAS PÉRDIDAS POR INVERSIÓN DE LA SACAROSA EN LA ESTACIÓN DE EVAPORACIÓN A MÚLTIPLE EFECTO**, presentado por el estudiante universitario **Gabriel Andrés Cifuentes Arguedas**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
Decano

Guatemala, 4 de octubre de 2013

/gdech



ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Por el sinfín de oportunidades con las que ha bendecido mi camino y su presencia indiscutible en cada paso de mi vida.
- Mis padres** Patricia María Teresita Arguedas Beltranena y Gabriel Estuardo Cifuentes Salinas, quienes me mostraron el camino del éxito con humildad y apoyo incondicional.
- Mi abuela** Margarita María Beltranena Matheu de Arguedas, el ángel con quien Dios bendijo a mi familia y la persona de mi mayor admiración.
- Mi abuelo** Roberto José Arguedas Martínez, quien desde muy pequeño, me motivó a tener grandes sueños y aspiraciones.
- Mis hermanos** Roberto y María Andrea Cifuentes Arguedas, quienes me motivan a dar mi máximo esfuerzo.
- Mis tíos** Rodrigo y Ana Arguedas Beltranena, Carol y Evelyn Cifuentes Salinas, quienes en todo momento apoyaron mi desarrollo.

AGRADECIMIENTOS A:

La Universidad de San Carlos de Guatemala	Por darme tantas lecciones y anécdotas en los mejores años de mi vida, en su hermoso campus.
Dr. Adolfo Gramajo	Por ser mi mentor, gran catedrático y modelo a seguir.
Mis amigos	Por brindarme su amistad incondicional y quienes entre fiesta y regañadientes, me empujaron a terminar mi carrera.
Dr. Jaime Peñaranda	Por proveerme tantos conocimientos, apoyo, recordarme que pensar es existir y darme más aspiraciones para mi vida.
Giovanni Ordoñez	Por apoyarme en todo el trayecto de formación que llevo en la industria azucarera y en la elaboración de mi informe final.
Ing. Eduardo Calderón	Por su amistad y apoyo incondicional.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS.....	VII
GLOSARIO.....	IX
RESUMEN.....	XV
OBJETIVOS/HIPÓTESIS.....	XVII
INTRODUCCIÓN.....	XIX
1. ANTECEDENTES.....	1
2. MARCO TEÓRICO.....	3
2.1. Proceso de obtención de azúcar en Guatemala.....	3
2.2. Materia prima.....	3
2.2.1. Caña de azúcar.....	3
2.2.2. Transporte de caña.....	3
2.2.3. Ingreso a patio de caña.....	4
2.3. Preparación de caña.....	4
2.3.1. Mesas alimentadoras.....	4
2.3.2. Conductores de caña.....	5
2.4. Extracción del jugo.....	5
2.4.1. Conductores de caña.....	5
2.5. Clarificación del jugo.....	6
2.5.1. Sulfitación del jugo.....	6
2.5.2. Alcalizado del jugo.....	6
2.5.3. Calentamiento del jugo.....	6
2.5.4. Filtración de lodos.....	7

2.6.	Evaporación	7
2.7.	Agotamiento	10
	2.7.1. Centrifugación	11
2.8.	Azúcares	11
	2.8.1. Clasificación	11
	2.8.2. Azúcares simples	11
	2.8.3. Azúcares compuestos	13
	2.8.4. Polisacáridos	13
2.9.	Inversión de la Sacarosa	14
2.10.	Cinética de inversión de la sacarosa	14
3.	MARCO METODOLÓGICO	17
3.1.	Variables	17
3.2.	Delimitación del campo de estudio	18
3.3.	Recurso humano disponible	19
3.4.	Recursos materiales disponibles (equipo, cristalería, reactivos)	19
3.5.	Técnica cuantitativa.....	25
	Diseño general	25
3.6.	Recolección y ordenamiento de la información	26
	3.6.1. Recolección de la información	26
	3.6.2. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información.....	28
	3.6.2.1. Procesamiento de la información	28
3.7.	Análisis estadístico.....	31
4.	RESULTADOS	33
5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	39

CONCLUSIONES	45
RECOMENDACIONES.....	47
BIBLIOGRAFÍA.....	49
APÉNDICES.....	51
ANEXOS	59

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Evaporador tipo Robert con alimentación Champman	8
2.	Sistema de evaporación a múltiple efecto y condensador barométrico	9
3.	Estación de evaporación a múltiple efecto	10
4.	Grupo funcionales de los monosacáridos.....	12
5.	Grupo funcional de las aldosas y cetosas respectivamente	12
6.	Azúcares compuestos	13
7.	Polisacárido pentosana	13
8.	Fórmula condensada de la sacarosa.....	14
9.	Potenciómetro	20
10.	Termómetro de imagen térmica	21
11.	Refractómetro	22
12.	Polarímetro.	23
13.	Sistema de evaporación a quinto efecto.....	27
14.	Pérdida porcentual de sacarosa estimada por modelo de Vukov con pH corregido por modelo de Schäffler	33
15.	Comparación entre pérdida porcentual de sacarosa estimada con pH medido en laboratorio contra corregido por modelo Schäffler	34
16.	Influencia en la pérdida de sacarosa por inversión en cada etapa de la evaporación.....	35
17.	Pérdida porcentual de sacarosa global por inversión en la evaporación a múltiple efecto.....	36

18.	Comparación de las pérdidas de sacarosa en las distintas etapas del proceso de fabricación	38
-----	--	----

TABLAS

I.	Variables a considerar en la estimación de pérdidas por inversión de la sacarosa	18
II.	Condiciones del jugo claro entrando a la evaporación	26
III.	Volumen de evaporadores en línea	27
IV.	Datos distribuidos por efecto	28
V.	Costo consecuente a la pérdida de sacarosa global estimada por modelo de Vukov	37

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
US\$	Dólar estadounidense
°C	Escala de temperatura Celsius
IR	Índice de refracción
gpm	Galones por minuto
°	Grado
kg	Kilogramo
kPa	Kilopascal
Lb	Libra
PSIG	Libra por pulgada cuadrada manométrica
L	Litro
mL	Mililitro
mm	Milímetro
min	Minuto
Pol	Polarización de la sacarosa
%	Porcentaje
GTQ	Quetzal guatemalteco
QQ	Quintal
t	Tonelada métrica
TCCD	Tonelada corta de caña día
TSJC	Tonelada de sacarosa en jugo extraído

GLOSARIO

Bagazo	Residuo sólido de la caña obtenido de molinos luego de la extracción.
Brix	Concentración de sólidos solubles.
Caña de azúcar	Gramínea tropical. Pasto gigante emparentado con el sorgo y el maíz. El tallo acumula un jugo rico en sacarosa, compuesto que al ser extraído y cristalizado en el ingenio forma el azúcar.
Calandria	Parte del evaporador conformada por carcasa y tubos en los cuales se da la transferencia de calor en el evaporador.
Carcasa	Cilindro que rodea el banco de tubos en la calandria de un evaporador y/o calentador.
Cinética	Área de la fisicoquímica que se encarga del estudio de la rapidez de reacción, cómo cambia la rapidez de reacción bajo condiciones variables y qué eventos moleculares se efectúan mediante la reacción general.
Cristalización	Es el proceso mediante el cual la sacarosa cambia a su forma cristalina por efecto de la sobresaturación.

<i>Degradation</i>	Descomposición de azúcares por afecciones externas.
Efecto	Etapa de la evaporación consistente en uno o más evaporadores alimentados con vapor a diferente presión según su procedencia.
Estación	Etapa del proceso de obtención de azúcar de caña.
Evaporación	Proceso de eliminación de agua del jugo clarificado por transferencia de calor con vapor como fuente.
Fibra	Material que compone la caña de azúcar consistente en celulosa.
Filtro rotatorio	Tambor rotatorio con sistema de vacío y mallas filtrantes que separa lodos del jugo filtrado.
<i>Flash</i>	Tanque elevado en el que se da liberación de aire de un fluido presurizado.
<i>Floc</i>	Masa de floculante formado en un fluido a través de la precipitación o agregación de partículas suspendida.
Flujo de recirculación	Flujo que se retorna en el proceso.

Filtración	Etapa de proceso en la que se separan lodos del jugo filtrado.
Ingenio azucarero	Fábrica de obtención de azúcar de caña.
Inversión	Reacción de hidrólisis o desdoblamiento de la sacarosa en glucosa y fructosa.
Ión hidronio	Catión de hidrógeno.
Jugo	Solución de sólidos solubles y no solubles en agua con un contenido de sacarosa.
Jugo extraído	Solución de sólidos solubles y no solubles en agua, con un contenido de sacarosa obtenido a presión en tándem de molinos.
Jugo clarificado	Jugo claro o separado de lodos en etapa de clarificación.
Jugo filtrado	Jugo de baja calidad obtenido en los filtros rotativos al extraer restos de sacarosa de lodos provenientes de la clarificación.
Lechada de cal	Suspensión de hidróxido de calcio en agua a 10 °Be.
Lodos	Sólidos separados del jugo clarificado en el clarificador que pasan a ser tratados en el área de filtración.

Masa cocida	Masa obtenida en el proceso de cristalización dentro de los tachos.
Melador	Evaporador o evaporadores que conformar el último efecto.
Múltiple efecto	Configuración de evaporadores en la que el vapor de entrada a la calandria de uno evapora cierta cantidad de agua del jugo y se usa para alimentar la calandria del subsecuente evaporador.
Pérdida	Sacarosa no recuperada en cualquier etapa del proceso.
Pérdida indeterminada	Pérdida de sacarosa de origen desconocido en el proceso.
pH	Logaritmo inverso de la concentración de ión hidronio en solución.
Quinto efecto	Configuración de evaporadores dispuestos en cinco etapas.
Sacarato de calcio	Mezcla de cal hidratada con meladura.
Sacarosa	Disacárido conformado por glucosa y fructosa.
Sacarosa aparente	Polarización de la sacarosa tomado como concentración de sacarosa en jugo.

Sacarosa invertida	Sacarosa desdoblada en glucosa y fructosa.
Tachero	Operador de tachos, encargado de la cristalización de la sacarosa.
Tacho	Evaporador a simple efecto donde ocurre el fenómeno de cristalización por sobresaturación.
Tándem	Conjunto de varios molinos y accesorios que constituyen la unidad de molienda de un ingenio.
Temperatura	Medida del calor o energía térmica de las partículas en una sustancia.
Templa	Mezcla de cristales de sacarosa y miel.
Tiempo de residencia	Lapso de tiempo en el cual el jugo se mantiene dentro de su respectivo recipiente.
Viradores	Cargadores hidráulicos de las jaulas traídas por camiones para el volteo de la caña en la mesa de preparación.

RESUMEN

En el siguiente informe se presentan, discuten y concluyen los resultados obtenidos en el estudio Estimación de las pérdidas por inversión de la sacarosa en la estación de evaporación a múltiple efecto, para el cual se recolectaron muestras de jugo en la evaporación de un ingenio azucarero, con el objetivo de estimar el porcentaje de pérdidas por inversión de la sacarosa en la evaporación a múltiple efecto.

Las muestras de jugo fueron recolectadas a la salida de los evaporadores en cada efecto, lugar donde se les midió su temperatura. Luego en el laboratorio, se les midió pH y °Brix. Con el último, se calcularon los tiempos de residencia del jugo en cada efecto por balance de sólidos.

Para el tratamiento de datos, se corrigieron los pH a la temperatura de proceso medida, utilizando el modelo de Schäffler y se estimaron los porcentajes de pérdida por inversión de la sacarosa en la evaporación a múltiple efecto con el modelo matemático de Vukov. Con el valor de pérdida obtenido, se calculó la repercusión monetaria consecuente para el ingenio azucarero.

Por último, se concluyó sobre la mayor pérdida de sacarosa en los primeros tres efectos de la estación, siendo el primer efecto el de mayor influencia en la pérdida; la necesaria corrección del pH a temperatura de proceso para la estimación; el costo monetario de la pérdida por inversión en las mediciones realizadas y la importancia de las pérdidas en la evaporación sobre las globales en el ingenio azucarero.

OBJETIVOS

General

Estimar el porcentaje de pérdida por inversión de la sacarosa en la estación de evaporación a múltiple efecto.

Específicos

1. Estimar el porcentaje de pérdida por inversión de la sacarosa por medición del pH, tiempo de residencia y temperatura del jugo a la salida de cada efecto con el modelo matemático de Vukov.
2. Comparar el porcentaje de sacarosa perdida estimada con el pH medido a temperatura de medición de laboratorio y corregido a la de proceso con el modelo de Schäffler.
3. Definir en qué efecto de la etapa de evaporación se da el mayor porcentaje de pérdida por inversión de la sacarosa estimado.
4. Estimar el porcentaje de pérdida global de sacarosa en la estación de evaporación a múltiple efecto.
5. Calcular el costo monetario consecuente a la pérdida de sacarosa estimada en la evaporación con base en la sacarosa aparente a la entrada de la estación.

HIPÓTESIS

Hipótesis estadística.

Hipótesis nula (H₀):

Existe una pérdida importante de sacarosa al paso del jugo a través de la evaporación a múltiple efecto.

$$H_0: \mu_1 \neq 0$$

Hipótesis alternativa (H_a):

No existe una pérdida importante de sacarosa al paso del jugo a través de la evaporación a múltiple efecto.

$$H_a: \mu_1 = 0$$

Donde:

μ_1 : Pérdida porcentual de sacarosa en evaporación

INTRODUCCIÓN

El proceso de fabricación de azúcar de caña es complejo y exhaustivo. La cantidad de sacarosa que embolsa un ingenio azucarero es una medida de lo eficiente y rentable que puede ser. En la industria azucarera de Guatemala, existe gran competitividad en el mercado del azúcar y los ingenios establecen cada uno sus metas de producción.

Ahora bien, existen puntos en los cuales se pierde sacarosa inevitablemente como consecuencia del proceso. Estos son cuidadosamente analizados para que las pérdidas sean reducidas, sin embargo, existen pérdidas indeterminadas de sacarosa, las cuales son más dificultosas de seguir y requieren de un análisis minucioso en el proceso.

En 1965, K. Vukov, determinó que la inversión es una reacción de primer orden con respecto a la sacarosa y desarrolló un modelo matemático para la estimación de las pérdidas por inversión en función del pH, temperatura y tiempo de residencia del jugo en una estación del proceso.

El presente estudio se enfocó en el análisis por medio de la poderosa herramienta conocida como el modelo matemático de Vukov, con el que se estimaron las pérdidas de sacarosa en la estación de evaporación a múltiple efecto utilizando mediciones de pH, temperatura y tiempo de residencia calculado del jugo en cada etapa de la estación.

La estimación de la sacarosa invertida en la evaporación para el ingenio azucarero, se realizó con el fin de estimar las pérdidas, actualmente

indeterminadas, de sacarosa en una de las etapas del jugo en el proceso y calcular su repercusión monetaria.

1. ANTECEDENTES

La industria azucarera guatemalteca es muy competitiva. En cada ingenio se establecen objetivos y metas de producción que demandan a los ingenieros de proceso, encontrar puntos de control que permitan recuperar la mayor cantidad de sacarosa proveniente de la caña de azúcar.

La caña de azúcar proveniente de campo, trae determinada cantidad de sacarosa, la cual es extraída y cristalizada en la planta de producción. En las distintas estaciones por las cuales pasa el jugo extraído, se encuentran puntos en los que inevitablemente se pierde sacarosa. Éstos son monitoreados y controlados por los ingenieros de proceso para minimizar las pérdidas.

En 1965, K. Vukov, del Instituto de Investigación de la Industria Azucarera Húngara, presentó en el Diario Internacional del Azúcar, el estudio *Kinetic aspects of sucrose hydrolysis* en español Aspectos cinéticos de la hidrólisis de la sacarosa en el cual mostró que la reacción de primer orden de inversión de la sacarosa, tiene una constante cinética directamente proporcional a la concentración del ión hidronio (H^+) en solución.

Con la base literaria de otros estudios, elaboró un modelo matemático, que contempla el pH de un jugo expuesto a una temperatura un determinado tiempo de residencia, el cual permite estimar las pérdidas por inversión de la sacarosa introduciendo la medición de las variables ya mencionadas.

En 1985, K. J. Schaffler, D.J. Muzzell y P.M. Schorn, realizaron el estudio *An evaluation of sucrose inversion and monosaccharide degradation across*

evaporation at Darnall mill, traducción Evaluación de la inversión de la sacarosa y degradación de monosacáridos a través de la evaporación en Ingenio Darnall, con el que determinaron el efecto de las altas temperaturas y tiempo de retención en la degradación de sacarosa y monosacáridos, utilizando el método analítico de medición de glucosa base brix en evaporadores tipo Kestner. Concluyeron en que la pérdida de sacarosa a través de este tipo de evaporador es una función del tiempo de retención, más que de la exposición a altas temperaturas.

En 1987, K.J. Schäffler elaboró el estudio *Estimation of pH sugar juices at high temperature* en español Estimación del pH a elevadas temperaturas en jugos de azucarados ya que el pH tiene un efecto significativo en el pH del jugo y para la estimación de las pérdidas de sacarosa, el valor de pH a temperatura ambiente puede subestimar el porcentaje de pérdidas. Para el mismo tomaron 80 muestras de jugo de diferentes ingenios y midiendo a 3 diferentes temperaturas, encontraron una regresión matemática de segundo grado para determinar el pH a temperatura de operación. Utilizando la ecuación de Vukov, estimaron las pérdidas con el ajuste elaborado de forma teórica.

En 2011, la Inga. Qca. Jenniffer Roxanna Ramírez Juárez, realizó el estudio Determinación de sacarosa invertida por efecto de recirculación de jugo clarificado de caña de azúcar, en un evaporador de placas de película descendente en el cual desarrolló un análisis diferencial de sólidos a entrada y salida del evaporador, pureza y azúcares reductores con la cual concluyó que el comportamiento de las variables es independiente del flujo de recirculación.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Proceso de obtención de azúcar en Guatemala

El proceso de elaboración de azúcar de caña, consiste en varias etapas, las cuales se resumen en: preparación de caña, extracción de jugo en molinos, clarificación del jugo, evaporación, clarificación de meladura, agotamiento en tachos y centrifugación.

2.2. Materia prima

La caña de azúcar proveniente de las siembras de campo, es transportada en camiones a los ingenios, donde pasa a las diferentes etapas de preparación.

2.2.1. Caña de azúcar

Es una gramínea tropical, un pasto gigante emparentado con el sorgo y el maíz. Tiene un tallo macizo de dos a cinco metros de altura con cinco o seis cm de diámetro. El tallo acumula un jugo rico en sacarosa, compuesto que al ser extraído y cristalizado en un ingenio forma el azúcar. La sacarosa es sintetizada por la caña gracias a la energía tomada del sol durante la fotosíntesis, con hojas que llegan a alcanzar de dos a cuatro metros de longitud.

2.2.2. Transporte de caña

Luego de alcanzar su período de cultivo, la caña es quemada para eliminar las hojas y dejar solamente los tallos, ricos en sacarosa. Luego la caña

es cortada de forma manual o mecanizada y por último cargada a jaulas que posteriormente serán transportadas por camiones. En Guatemala, los camiones pueden transportar hasta seis jaulas con varias toneladas de caña por jaula.

2.2.3. Ingreso a patio de caña

Al momento en que ingresa la caña al ingenio azucarero, es muestreada por el laboratorio de caña, el cual determina la cantidad de sacarosa, fibra y otras variables de interés que trae la caña de las diferentes fincas. Esto se hace con el fin de obtener una referencia para la evaluación del rendimiento y eficiencia del proceso de obtención de azúcar.

La caña luego es volteada por viradores en las mesas alimentadoras para comenzar el proceso de obtención, con la primera etapa que consiste en la preparación.

2.3. Preparación de caña

Para asegurar una extracción efectiva, la caña pasa por una etapa de preparación, en la cual se remueve cierta cantidad de polvo y tierra, se nivela el colchón de caña, se parte en trozos, se pica, desfibra y acolchona, entregando a los molinos.

2.3.1. Mesas alimentadoras

Las jaulas transportadas, son volteadas en la mesa de caña, la cual consiste en una gran bandeja inclinada con cadenas motrices y un nivelador o eje con dientes, que nivela los tallos para emparejar la alimentación y luego

pasa a una troceadora, otro eje con machetes que trocea la caña en pedazos que caen luego al conductor de caña

2.3.2. Conductores de caña

Los trozos de caña troceada caen de la mesa a un conductor de caña, donde son transportados hacia un nivelador que apelmaza el colchón y éste luego pasa a través de una picadora y después una desfibradora, las cuales terminan de preparar la caña desmenuzándola, completando la preparación y asegurando una mejor extracción en el área de molinos.

2.4. Extracción del jugo

El bagazo preparado pasa por un tándem de molinos, el cual consiste en cinco molinos que extraen el jugo del bagazo ingresado con ayuda de agua de imbibición, completado por una maceración compuesta.

2.4.1. Conductores de caña

La caña preparada ingresa al tándem de molinos donde baja por un conductor vertical directamente a la masa cañera del primer molino. Cada molino consiste en cuatro masas por las cuales pasa la caña preparada y se aplica presión para extraer el jugo y luego dejar bagazo residual que sirve para la alimentación del siguiente.

El objetivo de colocar los molinos en un tándem, es extraer la mayor cantidad de jugo posible de la caña preparada y sacar luego un bagazo bajo en concentración de sacarosa, transportado por conductores que lo llevan a la caldera para servir como combustible de las mismas.

2.5. Clarificación del jugo

El jugo extraído pasa luego a la estación de clarificación, que consiste en varias etapas que tienen como objetivo la remoción de lodos e impurezas provenientes de campo y caña para asegurar un jugo clarificado con un pH que minimice la inversión en la subsecuente operación de evaporación.

2.5.1. Sulfitación del jugo

En esta etapa, el jugo se pone en contacto con dióxido de azufre, obtenido de la quema de azufre en un horno, con el objetivo de disminuir el color del jugo, aumentar el brillo, eliminar microorganismos y disminuir la viscosidad.

2.5.2. Alcalizado del jugo

Al jugo sulfitado luego se le agrega lechada de cal que consiste en una suspensión de cal con agua o con jugo/meladura (sacarato de calcio), en la cual se neutraliza la acidez del jugo. Esta etapa se conoce normalmente como defecación. La formación de *flocs* de fosfato cálcico para la subsecuente etapa de calentamiento y floculación es vital para la clarificación del jugo.

2.5.3. Calentamiento del jugo

El jugo alcalizado es luego calentado por etapas hasta llevarlo a su temperatura de ebullición, con el fin de acelerar las reacciones químicas entre la cal agregada, los fosfatos y desnaturalizar las proteínas contenidas en el jugo para la formación de *flocs* de base $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$. También se calienta con el fin de proteger el jugo de microorganismos y posteriormente a su paso por un tanque

flash, el jugo es despresurizado y expulsa rápidamente el aire atrapado o disuelto en el jugo.

El jugo pasa dentro del clarificador luego de ser puesto en contacto a la salida del *flash*, con floculante, el cual permite atrapar los flóculos formados en las etapas de alcalizado y calentamiento. Luego, se obtiene el jugo clarificado listo para la entrada a la evaporación y el subproducto o contenido de impurezas conocido como cachaza, el cual va a la estación de filtración para recuperar una parte del jugo que lleva en sí.

2.5.4. Filtración de lodos

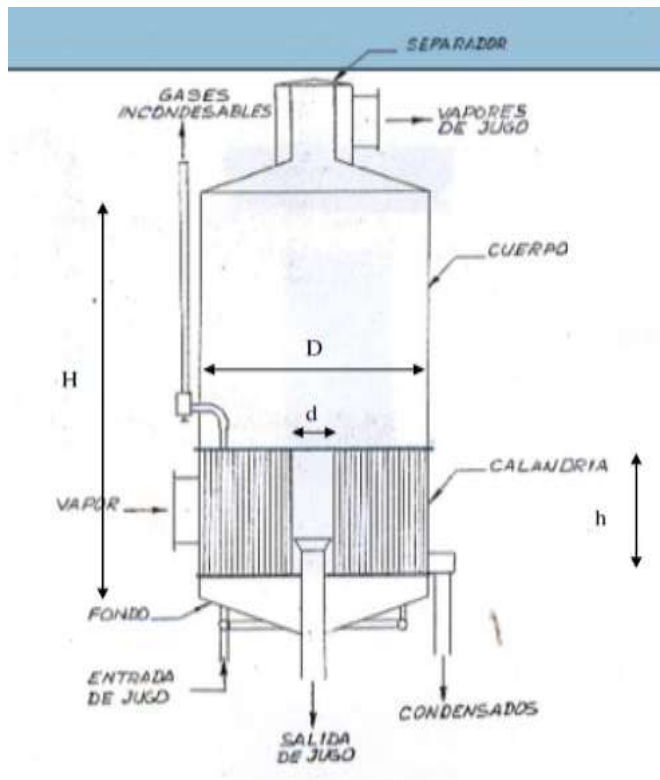
Los lodos separados en el clarificador son transportados a la estación de filtración, que consiste en filtros rotatorios o de Banda, los cuales funcionan con un sistema de vacío bajo y alto con los que se obtiene un jugo filtrado que es recirculado al alcalizado y la cachaza retirada con camiones para servir de abono en campo.

2.6. Evaporación

El jugo clarificado, siendo sacarosa disuelta en agua con ciertas impurezas, pasa a los evaporadores. Estos tienen como objetivo la remoción de la mayor cantidad de agua, concentrando la solución de 15 °Brix a 65 °Brix.

Hay distintos tipos de evaporadores de los cuales se nombrará solamente el tipo Robert, el cual consiste en un cuerpo cilíndrico con una calandria en la parte inferior, en la cual entra vapor de lado de la carcasa y dentro de los tubos pasa el jugo al cual se le remueve el agua.

Figura 1. **Evaporador tipo Robert con alimentación Chapman**



Fuente: HUGOT, Emile. Manual para ingenieros azucareros. p. 349.

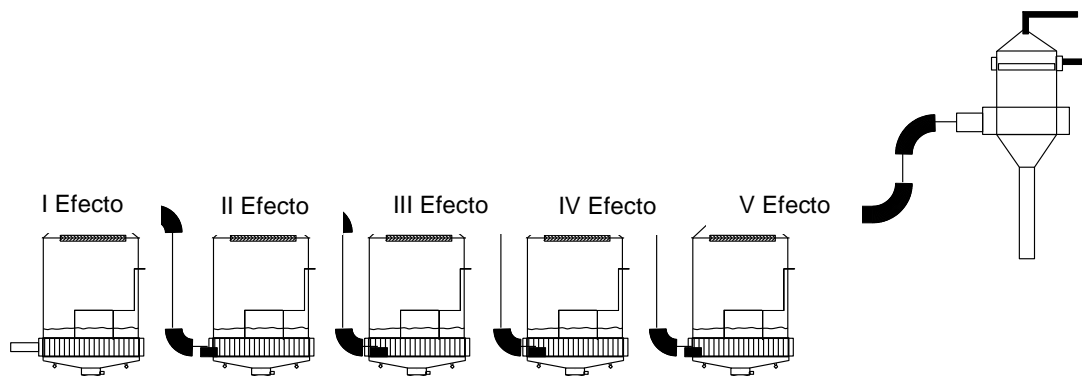
La configuración de los evaporadores mencionada arriba, usualmente está dispuesta en múltiple efecto, que consiste en alimentar vapor de una fuente viva, conocido como vapor de escape, proveniente de los turbogeneradores y subsecuentemente el vapor que se genera pasa alimentar a los siguientes vasos hasta llegar al último evaporador.

Cada evaporador recibe su nomenclatura de acuerdo al vapor que lo alimenta; los vasos alimentados en calandria con vapor vivo se conocen como primer efecto; vasos alimentados en calandria con este vapor son segundo

efecto y así sucesivamente hasta alcanzar regularmente el cuarto o quinto efecto.

El quinto efecto alimenta su vapor a un condensador barométrico que lo condensa y genera vacío por el abrupto cambio en el volumen específico del vapor a líquido. Esta diferencia de presión entre el primero y último efecto funciona como motor del múltiple efecto.

Figura 2. **Sistema de evaporación a múltiple efecto y condensador barométrico**



Fuente: WRIGHT, Peter. Introduction to sugar mill technology. p. 6.

En la estación de evaporación, el jugo se mantiene expuesto a altas temperaturas en particular en el primer efecto, durante el tiempo de residencia que tiene dentro de los evaporadores, lo cual tiene una influencia sobre la inversión de la sacarosa a su paso por esta etapa. De hecho, la mayor temperatura a la que se somete el material en todo el proceso, se encuentra en el primer efecto.

Figura 3. **Estación de evaporación a múltiple efecto**



Fuente: estación de evaporación en ingenio azucarero.

2.7. Agotamiento

El producto final de la evaporación es un jugo concentrado que sirve de alimentación en los tachos. La cristalización tiene lugar en tachos al vacío de simple efecto, donde la meladura se lleva a etapa de sobresaturación. En este momento se añaden semillas a fin de que sirvan de núcleos para los cristales de azúcar, y se añade más meladura según se evapora el agua.

El crecimiento de los cristales continúa hasta que se llena el tacho. Bajo la vigilancia de un tachero experto, los cristales originales crecen sin que se formen cristales adicionales, de manera que, cuando el tacho está totalmente lleno todos los cristales tienen el tamaño deseado. Los cristales y la meladura forman una masa densa conocida como masa cocida; a continuación la templa se descarga por medio de una válvula de pie a un mezclador.

2.7.1. Centrifugación

La masa cocida en el mezclador es luego vertida en centrifugas, que la separan en los cristales de azúcar de la miel que los contiene.

2.8. Azúcares

Son conocidos como hidratos de carbono, por su composición química con fórmula general $(CH_2O)_n$. Los azúcares se encuentran ampliamente distribuidos en la naturaleza. Se han aislado más de 30.

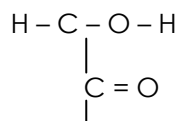
2.8.1. Clasificación

Los azúcares pueden clasificarse como simples o complejos. Incluyen los monosacáridos, disacáridos y polisacáridos respectivamente. Son compuestos inodoros, cristalinos usualmente de sabores dulces y en su mayoría solubles en agua. El grupo completo de los sacáridos, llamados carbohidratos, constituyen aproximadamente las tres cuartas partes de la materia seca de los vegetales

2.8.2. Azúcares simples

También llamados monosacáridos, pueden definirse como aldehídos o cetona – alcoholes de la serie alifática, con moléculas que contienen un grupo carbonilo y uno o más grupos alcohol, uno de estos siempre adyacente al grupo carbonilo. Todos contienen por consiguiente el grupo:

Figura 4. **Grupo funcionales de los monosacáridos**



Fuente: PEÑARANDA, Jaime. Sacarosa, glucosa y fructosa, propiedades. p 1.

Los azúcares que contienen el grupo aldehído se denominan en forma general aldosas y los que contienen la función cetona se llaman cetosas.

Figura 5. **Grupo funcional de las aldosas y cetosas respectivamente**



Fuente: PEÑARANDA, Jaime. Sacarosa, glucosa y fructosa, propiedades. p 2.

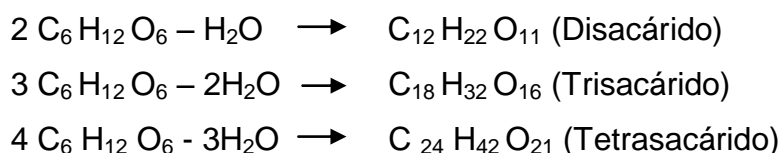
De acuerdo al número de carbonos, los monosacáridos se dividen y nombran como diosas ($\text{C}_2\text{H}_4\text{O}_2$), triosas ($\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_3$), tetrasas ($\text{C}_4\text{H}_8\text{O}_4$), etc. Las hexosas son de particular interés en la fabricación de azúcar de caña. Son abundantes en la naturaleza, sustancias cristalizables, solubles en agua y poco en alcohol. Aquellas que proceden de la naturaleza poseen poder rotatorio dextrógiro y levógiro.

Además, poseen la propiedad de fermentarse por la acción de levaduras, hongos y bacterias dando lugar a varios desdoblamientos.

2.8.3. Azúcares compuestos

Se forman por la condensación de dos, tres o cuatro moléculas de monosacáridos, eliminándose una molécula de agua.

Figura 6. **Azúcares compuestos**



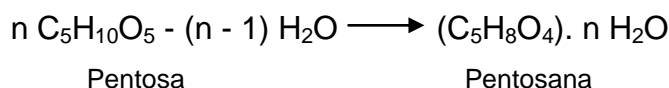
Fuente: PEÑARANDA, Jaime. Sacarosa, glucosa y fructosa, propiedades. p. 2.

Los disacáridos conocidos son derivados de las hexosas por lo que tienen la fórmula condensada $\text{C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11}$. Estos compuestos fijan una molécula de agua y se desdoblan a su vez en moléculas de hexosas. Dicha reacción se conoce con el nombre de hidrólisis y es la de mayor importancia en la fabricación de azúcar de caña.

2.8.4. Polisacáridos

Se forman por la condensación de un número indefinido de moléculas de monosacáridos.

Figura 7. **Polisacárido pentosana**

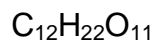


Fuente: PEÑARANDA, Jaime. Sacarosa, glucosa y fructosa, propiedades. p. 2.

2.9. Inversión de la Sacarosa

Es el más importante de los disacáridos. Está formado por una molécula de glucosa y otra de fructosa o levulosa. Se encuentra en los jugos de la caña de azúcar (*Saccharum Officinarum*), en la remolacha azucarera (*Beta Marítima*), en el arce (*Hacer Sacchariferum*) y en otras semillas.

Figura 8. **Fórmula condensada de la sacarosa**



Fuente: PEÑARANDA, Jaime. Sacarosa, glucosa y fructosa, propiedades. p. 3.

La Sacarosa cristaliza en el sistema monoclinico, en cristales anhidros, transparentes, hemihedrales. Es soluble en agua y en alcohol etílico diluido, insoluble en alcohol absoluto, éter, cloroformo, glicerina anhidra, aceite de castor. Cuando se calienta la sacarosa en medio de ácido, sufre un cambio químico que se conoce como inversión.

2.10. Cinética de inversión de la sacarosa

El proceso de inversión del azúcar es la descomposición hidrolítica de la sacarosa en glucosa y fructosa, reacción prácticamente irreversible, para la cual K. Vukov, en 1965 presentó un estudio llamado, *Kinetic aspects of sucrose hydrolysis*, en español Aspectos cinéticos de la inversión de la sacarosa, en el cual estableció que la inversión de la sacarosa, es una reacción de primer orden respecto a la sacarosa, con una constante cinética de reacción proporcional a la actividad del ión hidrógeno dentro de amplios límites.

- Reacción de primer orden:

$$\frac{dx}{dt} = k_0 c_w c_s = k_a c_s \quad (1)$$

Donde:

$\frac{dx}{dt}$ = Velocidad de formación de azúcar invertido [kg/min]

k_0 = Velocidad de reacción a solución infinita [min⁻¹]

k_a = Constante de hidrólisis de la sacarosa [min⁻¹]

c_w = Concentración de agua [kg/L]

c_s = Concentración de sacarosa [kg/L]

Con la ecuación de Arrhenius, asumiendo que la velocidad de reacción es directamente proporcional a la actividad del ión hidrógeno, llegó a:

$$\log k_a = 16.91 + \log \left(\rho \left(\frac{100 - Bx}{Bx} \right) \right) - \frac{5670}{T} - pH \quad (2)$$

Donde:

k_a = Constante cinética de inversión [min⁻¹]

T = Temperatura absoluta [K]

ρ = Densidad de la solución [kg/L]

Bx = Concentración de sólidos solubles [°Brix]

Su modelo matemático proporcionó la herramienta necesaria para la estimación de las pérdidas por inversión de la sacarosa.

3. MARCO METODOLÓGICO

3.1. Variables

Con la base literaria investigada se encontraron los factores influyentes en la pérdida por inversión de la sacarosa en el paso del jugo por la evaporación a múltiple efecto para su estimación con el modelo matemático de Vukov.

Es cierto que en el proceso de obtención de azúcar proveniente de la caña, es dificultoso mantener un estado estacionario pero la estación de evaporación, está dispuesta de varios controles automáticos que facilitan esta condición por lo que las variables constantes, controlables y no controlables fueron definidas dentro de la experimentación.

Tabla I. **Variables a considerar en la estimación de pérdidas por inversión de la sacarosa**

No.	Variable	Dimensión al	Variables		Factores Perturbadores	
			Constante	Variable	Controlable	De Ruido
Condiciones y propiedades del jugo a su paso por la evaporación						
1.	pH de jugo claro y salida de cada efecto	---		X		X
2.	Temperatura	°C	X		X	
3.	Tiempo residencia	Min	X		X	
4.	Concentración de sólidos solubles	°Brix		X		X
5.	Sacarosa aparente del jugo clarificado	Pol	X			X
6.	Caudal de jugo claro	L/min	X		X	
7.	Presión de escape	Psig	X			X

Fuente: elaboración propia.

3.2. Delimitación del campo de estudio

Se delimitaron los aspectos a consideración del estudio.

- Área: especialización
- Industria: azucarera
- Proceso: aplicación del modelo matemático de Vukov como herramienta de estimación de las pérdidas por inversión de la sacarosa en la evaporación a múltiple efecto de un proceso de fabricación de azúcar.

- Etapa del proceso: evaporación múltiple efecto
- Ubicación: las muestras serán tomadas en la evaporación de la línea 2 de producción y analizadas en el laboratorio de caña del ingenio azucarero.
- Clima: el municipio de Masagua, Escuintla se encuentra a 100 m sobre el nivel del mar, con un clima de la época entre 28 y 33 °C, seminublado y con lluvia de temporada.

3.3. Recurso humano disponible

Para la elaboración del estudio, personal del ingenio azucarero trabajó en conjunto con la Universidad San Carlos de Guatemala.

- Investigador: Gabriel Andrés Cifuentes Arguedas
- Asesor en USAC: Dr. Ing. Adolfo Narciso Gramajo Antonio
- Asesor en ingenio: Dr. Ing. Jaime Peñaranda Domínguez

3.4. Recursos materiales disponibles (equipo, cristalería, reactivos)

El presente proyecto de investigación se llevó a cabo en las instalaciones del ingenio azucarero, ubicado en Masagua, Escuintla. Tanto la recolección de muestras, como los análisis de laboratorio.

- Determinación de pH: a temperatura ambiente

El pH de las muestras se midió en el laboratorio de caña.

Figura 9. **Potenciómetro**



Fuente: laboratorio de caña en ingenio azucarero.

- **Equipo**
 - Potenciómetro WTW Inolab pH 730
 - Capacidad máxima: 14
 - Capacidad mínima: 0
 - Tolerancia: ± 0.12
- **Cristalería**
 - Beacker plástico de 100 mL
- **Metodología de medición**
 - Lavar el electrodo del potenciómetro con agua desmineralizada.

- Introducir electrodo, en el beaker que contenga la muestra a analizar, se toma la lectura directa del potenciómetro.
 - Lavar electrodo con agua desmineralizada.
 - Anotar resultado en registros correspondientes.
-
- Temperatura: medición de operación

La temperatura de operación se midió en el lugar de recolección de la muestra.

Figura 10. **Termómetro de imagen térmica**



Fuente: laboratorio de caña en ingenio azucarero.

- Equipo
 - Termómetro de imagen térmica FLUKE Ti125
 - Capacidad máxima: 350 °C
 - Capacidad mínima: -20 °C
 - Tolerancia: ± 0.1 °C

- Concentración de sólidos solubles: °Brix

La concentración de sólidos solubles fue medida en el laboratorio de caña.

Figura 11. **Refractómetro**



Fuente: laboratorio de caña en ingenio azucarero.

- **Equipo**
 - Refractómetro Rudolf Research Analytical J157
 - Parámetro: ° Brix
 - Tolerancia del equipo: ± 0.15 ° Brix / ± 0.00021 IR
 - Longitud de onda: 589.3 nm
- **Metodología de medición**
 - Lavar el lente del refractómetro con agua desmineralizada y secar con servilleta de papel.
 - Verter una alícuota de la muestra de jugo.
 - Tomar la lectura directa del refractómetro y anotar en registros correspondientes.

- Polarización de la sacarosa

La concentración de sacarosa en jugo se midió con equipo de laboratorio.

Figura 12. **Polarímetro**



Fuente: laboratorio de caña en ingenio azucarero.

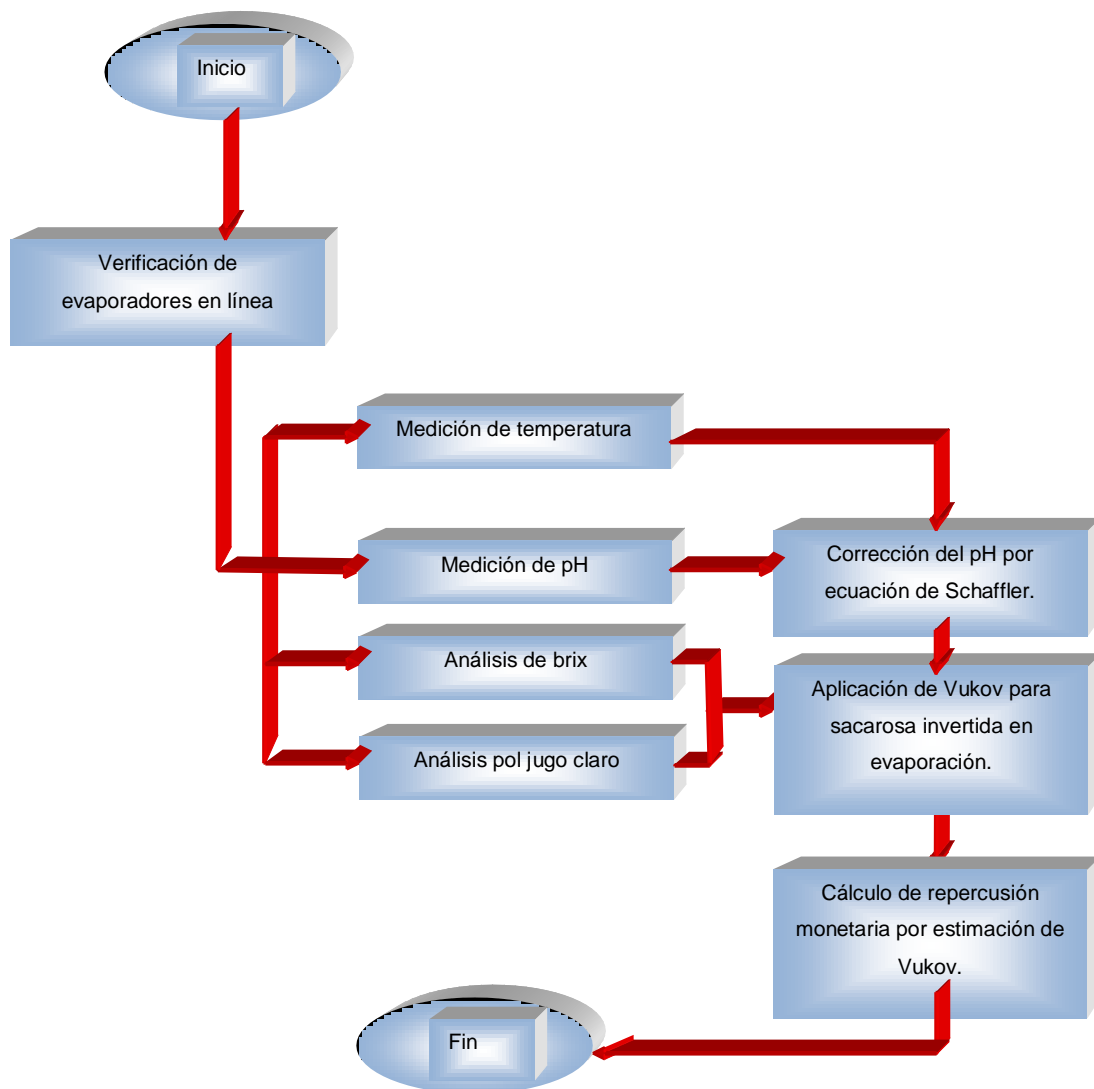
- Equipo
 - Polarímetro Rudolph Research Analytical Autopol II S.N.G.
 - Parámetro: Pol
 - Capacidad máxima: $99^{\circ} Z$
 - Capacidad mínima: $0^{\circ} Z$
 - Tolerancia del proceso: $\pm 0.18^{\circ} Z$
 - Tolerancia del equipo: $\pm 0.06^{\circ} Z$
 - Rotación óptica: $\pm 225^{\circ} Z$ ISS
 - Longitud de onda: 589 nm
 - Papel filtro
 - Balón aforado 200 mL ± 0.2 mL
 - Cápsula de acero inoxidable
 - Octapol
 - Beacker 250 mL ± 5 mL
 - Balanza analítica ± 0.0001 g

- Metodología de medición
 - Tarar una cápsula de acero inoxidable, se pesan 52 g de la muestra de jugo.
 - Transferir la muestra de jugo cuantitativamente a un balón de 200 mL cuidando el lavar la cápsula, luego aforar el balón con agua desmineralizada.
 - Agregar 2 g de octapol en un beaker inoxidable de 1 000 mL.
 - Filtrar la muestra utilizando papel filtro de 18,5 cm y se recibe en un beaker de 250 mL.
 - Trasladar muestra a un beaker con embudo y papel filtro, el filtrado, lavar el beaker con la muestra filtrada.
 - La muestra filtrada se agrega a un polarímetro de flujo constante 200 mm, asegurándose de lavar, una vez, con la muestra filtrada.
 - Tomar la lectura directa del polarímetro y anotar el resultado en registros correspondientes.

3.5. Técnica cuantitativa

El desarrollo de la metodología se planteó en base a la recolección de muestras, análisis y cálculos para la estimación de las pérdidas por inversión de la sacarosa.

Diseño general



Fuente: elaboración propia, Formas de Microsoft Word 2010.

3.6. Recolección y ordenamiento de la información

Para la recolección de datos, se instalaron toma muestras, que consisten en tubos sellados con válvulas, a la salida de cada evaporador, lugar donde se obtuvo lectura de la temperatura y luego en el laboratorio, se analizaron pH y °Brix de los jugos. Los datos fueron luego, tabulados en hojas de cálculo.

La estación de evaporación múltiple efecto del ingenio azucarero cuenta con doce evaporadores, cada uno con un volumen y determinada cantidad de tubos. Las muestras fueron tomadas de los evaporadores trabajando al momento de recolección, con un caudal de 204 m³/min (900 gpm) y una presión de escape absoluta de 240 kPa (20 psig).

3.6.1. Recolección de la información

Los datos de proceso de la tabla II, se tomaron al inicio de la recolección de muestras.

Tabla II. **Condiciones del jugo claro entrando a la evaporación**

Corrida	Presión de escape [psig]	Caudal [L/min]	°Brix	Pol	pH
1					
2					
3					
4					

Fuente: elaboración propia.

El volumen de cada efecto en la evaporación se tomó en base a la tabla III.

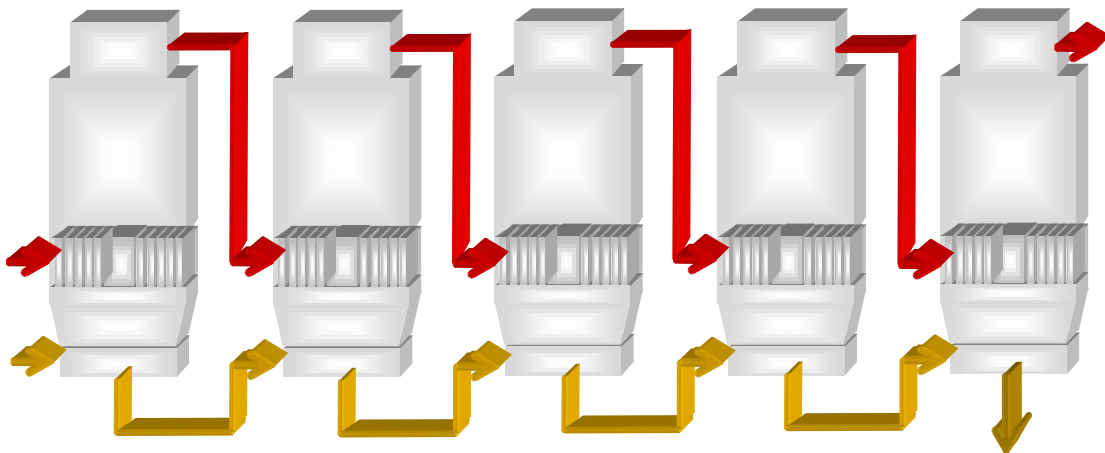
Tabla III. **Volumen de evaporadores en línea**

Corrida	Volumen [L]				
	I Efecto	II Efecto	III Efecto	IV Efecto	V Efecto
1					
2					
3					
4					

Fuente: elaboración propia.

El balance de masa realizado en la evaporación sigue la secuencia de un quintuple efecto sin extracciones.

Figura 13. **Sistema de evaporación a quinto efecto**



Fuente: elaboración propia, Formas de Microsoft Word 2010.

3.6.2. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información

La recolección de datos se realizó al momento de tomar las muestras para la temperatura y luego en laboratorio de caña para la medición del pH y °Brix.

Tabla IV. **Datos distribuidos por efecto**

Corrida i					
Paso del jugo	I Efecto	II Efecto	III Efecto	IV Efecto	V Efecto
Temperatura [°C]					
Brix [%]					
pH @ T laboratorio °C					

Fuente: elaboración propia.

Los valores de temperatura, Brix y pH se tomaron en cada corrida elaborada.

3.6.2.1. **Procesamiento de la información**

Para la estimación de las pérdidas por inversión de la sacarosa, se utilizaron los datos obtenidos por corrida. Los cálculos partieron de un balance de sólidos en la estación por las mediciones de sólidos solubles obtenidas en el laboratorio.

- Densidad del jugo:

$$\rho_{Ji} = \frac{1005,3 - 0,22556 * T_i - 0,0024304 * T_i^2 + 3,3697 * Bx + 0,0019182 * Bx_i^2}{1000} \quad (3)$$

Donde:

ρ_{Ji}	= densidad del jugo	[kg/L]
T_i	= temperatura del jugo	[°C]
Bx_i	= concentración de sólidos solubles	[°Brix]

- Flujo másico entrada:

$$m_{Ji} = \dot{V}_i * \rho_{Ji} \quad (4)$$

Donde:

m_{Ji}	= flujo másico de jugo	[kg/min]
\dot{V}_i	= caudal de jugo a la entrada de efecto	[L/min]

- Balance de masa de jugo y vapor generado:

$$Bx_j m_{Jj} = Bx_i m_{Ji}$$

$$m_{Ji} = m_{Jj} + v_i \quad (5)$$

$$v_i = \left(1 - \frac{Bx_i}{Bx_j}\right) m_{Ji}$$

$$m_{Jj} = m_{Ji} - v_i \quad (6)$$

Donde:

m_{Jj}	= flujo másico a la salida de efecto	[kg/min]
----------	--------------------------------------	----------

Bx_j = concentración de sólidos solubles [°Brix]
 v_j = flujo de vapor generado por efecto [kg/min]

- Flujo volumétrico en cada efecto:

$$\dot{V}_j = \frac{m_{Ji}}{\rho_{Ji}} \quad (7)$$

Donde:

\dot{V}_j = caudal de jugo a salida por efecto [L/min]

- Tiempo de residencia del jugo:

$$\theta_i = \frac{V_{Efecto}}{\dot{V}_j} \quad (8)$$

Donde:

θ_i = tiempo de residencia del jugo [min]

V_{Efecto} = volumen ocupado por jugo en cada efecto [L]

- Corrección del pH a temperatura de proceso por modelo de Schäffler:

$$\frac{dpH}{dT} = -0.0339 + 0.015 * pH_{25^\circ C} - 0.0017 * pH_{25^\circ C}^2 \quad (9)$$

$$pH_{T_i} = pH_{T_{25^\circ C}} + (T_i - 25) * \frac{dpH}{dT}$$

Donde:

pH_{T_i} = pH ajustado a temperatura de operación

$\frac{dpH}{dT}$ = cambio de pH con temperatura [°C⁻¹]

$pH_{T_{25^{\circ}C}} = \text{pH tomado a temperatura de laboratorio}$ []

- Constante cinética de inversión de la sacarosa por efecto:

$$k_{ai} = 10^{16.91 + \log\left(\rho_i \left(\frac{100 - Bx_i}{Bx_i}\right)\right) - \frac{5670}{T_i} - pH_i} \quad (10)$$

Donde:

k_a = constante cinética de inversión [min⁻¹]

ρ = densidad de la solución [kg/L]

- Porcentaje de sacarosa invertida respecto a la entrante a la estación:

$$P = (1 - e^{-k_a * \theta}) * 100 \quad (11)$$

Donde:

P = pérdida de sacarosa estimada [%]

k_a = constante cinética de inversión [min⁻¹]

θ = tiempo de residencia del jugo [min]

La aplicación del modelo matemático de Vukov se hizo con los resultados de pH obtenidos por el ajuste de Schöffler, comparándolos con los medidos a temperatura de laboratorio. Se realizó con la proporción de aumento en la pérdida por inversión. Por último, la repercusión monetaria se calculó con la base pol entrando a la evaporación, proveniente de la tabla II.

3.7. Análisis estadístico

La información recaudada se tabuló, trabajando con los valores promedio según fuera el caso. Para el cumplimiento de la hipótesis estadística, se realizó

una comparación de las pérdidas porcentuales en cada estación de control del ingenio azucarero. Con ello se realizó un pie para mostrar la importancia de las pérdidas por inversión de la sacarosa en la estación de evaporación a múltiple efecto con respecto a las pérdidas en patio, molinos, filtración e indeterminadas.

- Media aritmética:

$$\bar{x} = \frac{\sum_i^n x_i}{n} \quad (12)$$

Donde:

\bar{x} = media aritmética []

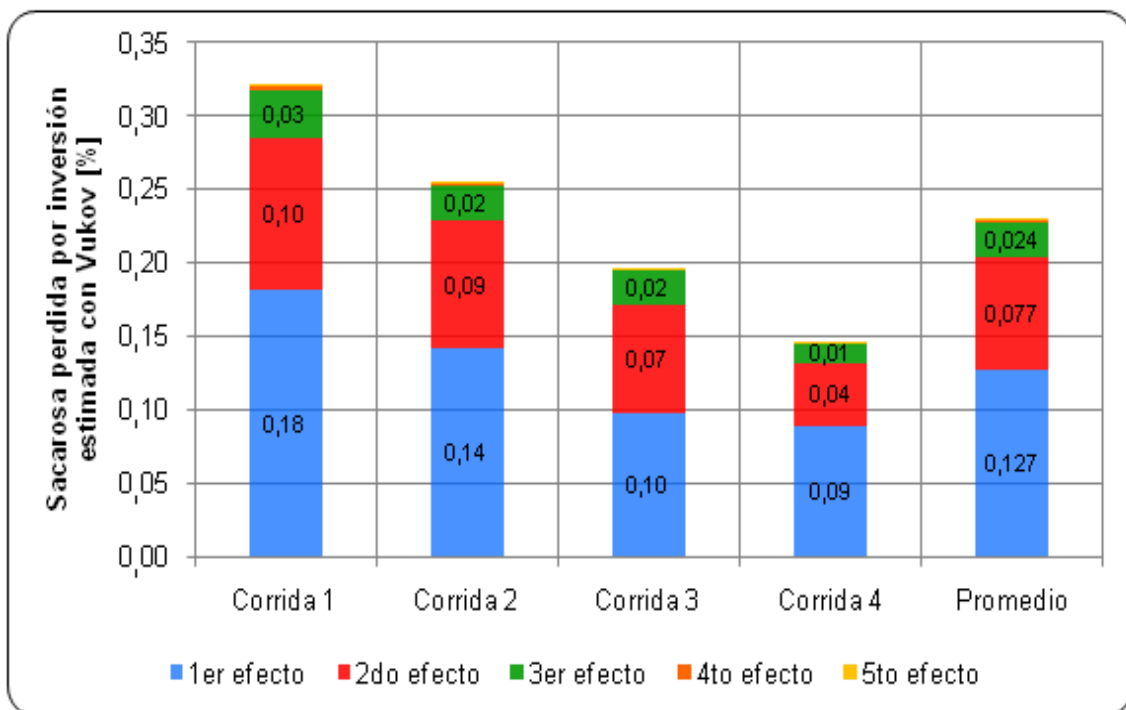
x_i = variable evaluada []

n = número de muestras []

4. RESULTADOS

Los resultados obtenidos para alcanzar los objetivos planteados se presentan en la forma esquematizada en el marco metodológico.

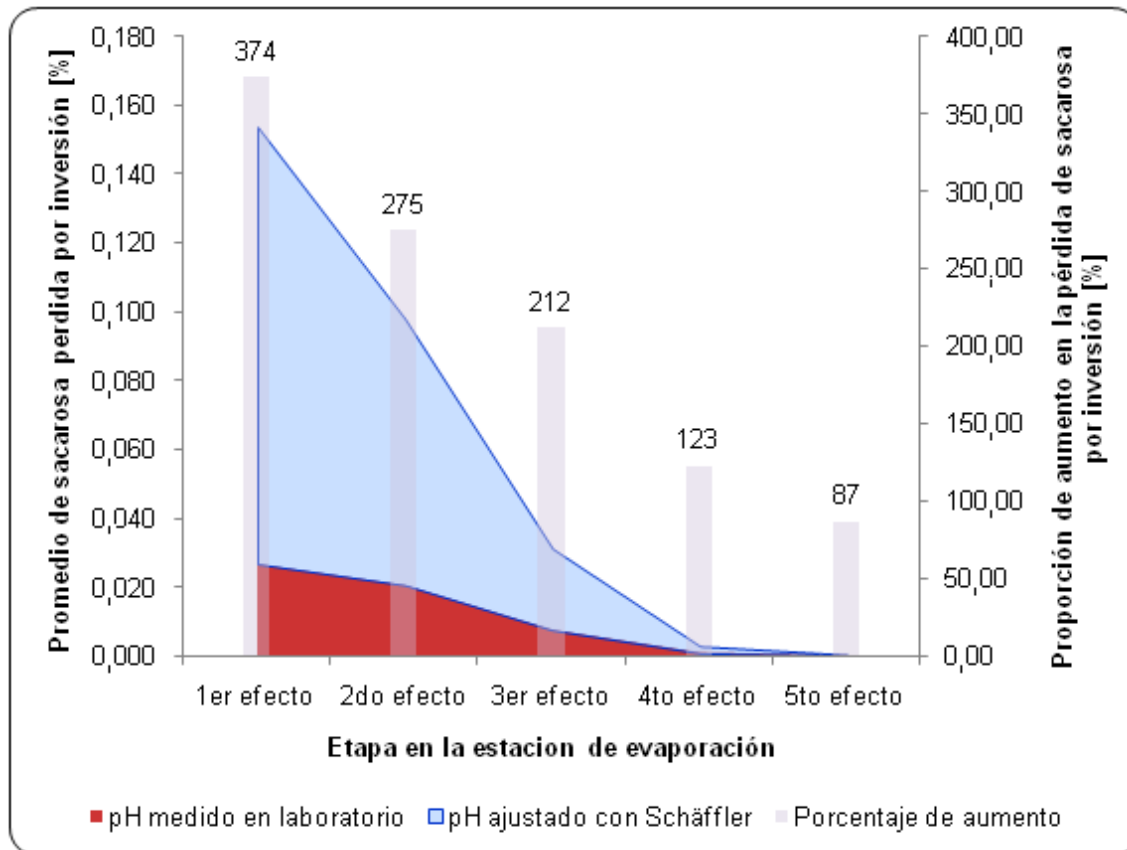
Figura 14. **Pérdida porcentual de sacarosa estimada por modelo de Vukov con pH corregido por modelo de Schäffler**



Fuente: elaboración propia, con programa Microsoft Excel 2010.

La figura 14 muestra el porcentaje de sacarosa perdida por inversión estimado por el modelo matemático de Vukov en la estación de evaporación a múltiple efecto con el pH de las muestras corregido por el modelo de Schäffler. Los valores se encuentran en las tablas 3, 4, 5, 6 y 7, apéndice C.

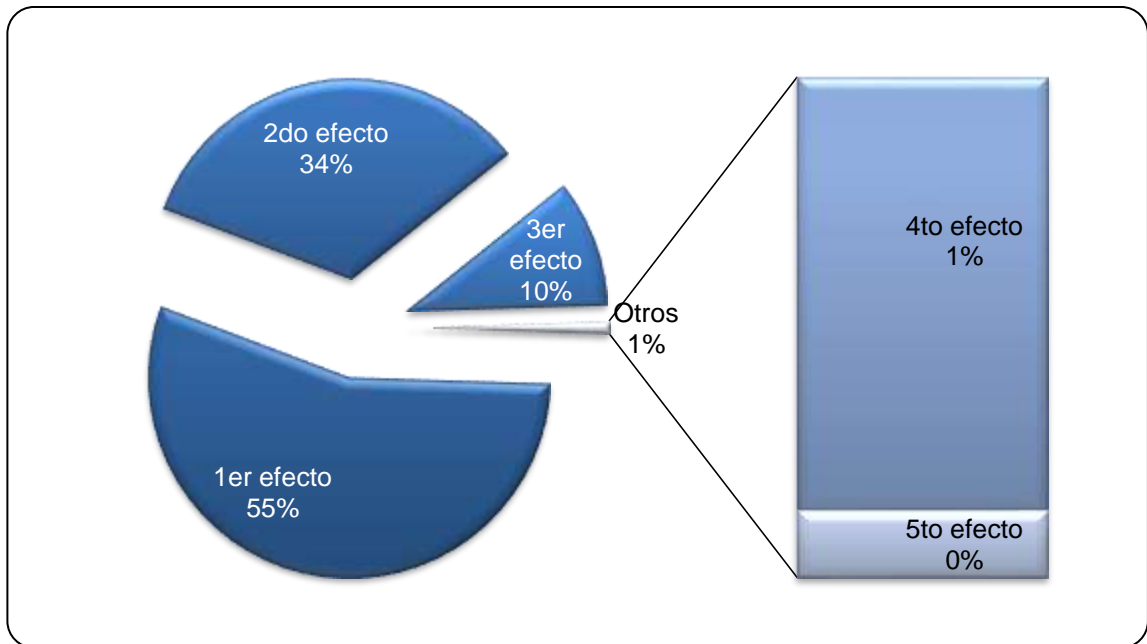
Figura 15. **Comparación entre pérdida porcentual de sacarosa estimada con pH medido en laboratorio contra corregido por modelo Schäffler**



Fuente: elaboración propia, con programa Microsoft Excel 2010.

La figura 15 muestra la comparación gráfica entre el porcentaje de sacarosa perdida por inversión promedio estimado con el modelo de Vukov, usando las mediciones de pH a temperatura de laboratorio y corregido a temperatura de proceso por el modelo de Schäffler. Además, la proporción de aumento en la sacarosa invertida respecto a la calculada sin la corrección del pH. Los valores se encuentran en la tabla 7, apéndice C.

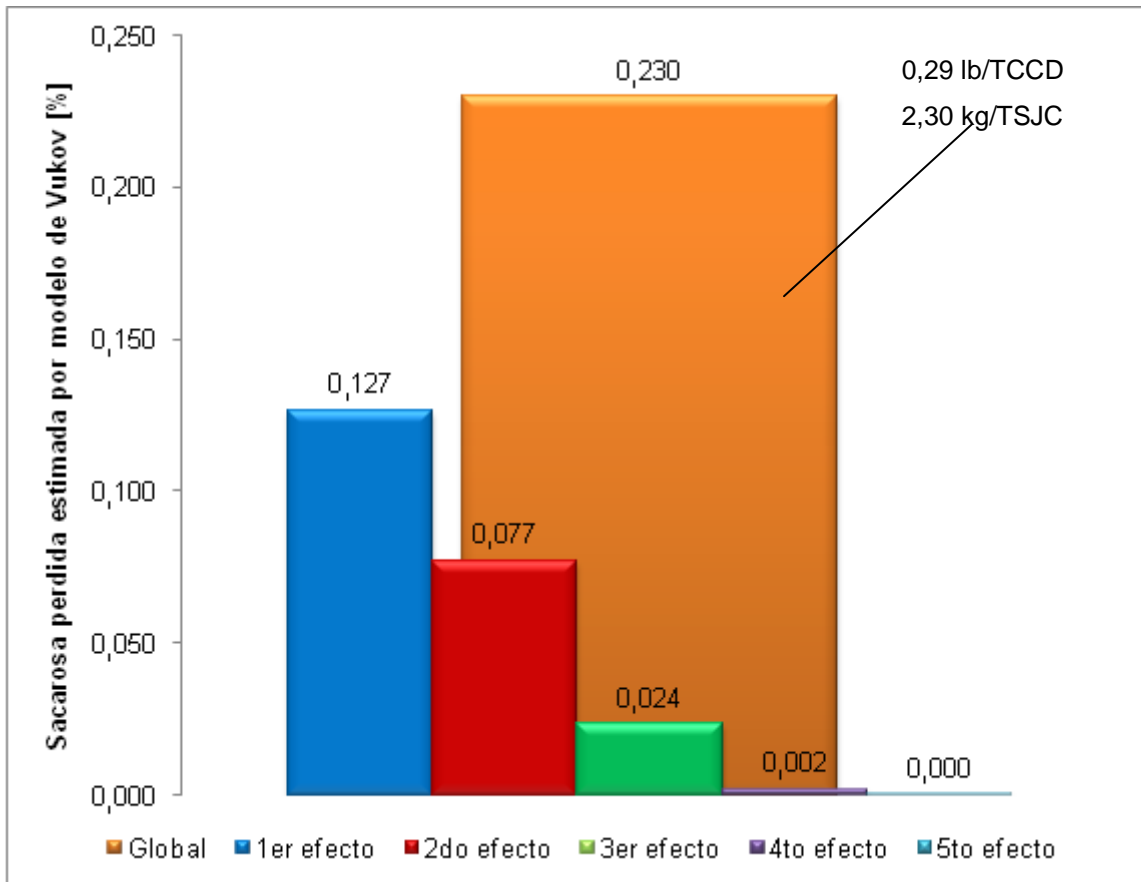
Figura 16. **Influencia en la pérdida de sacarosa por inversión en cada etapa de la evaporación**



Fuente: elaboración propia, con programa Microsoft Excel 2010.

La figura 16 muestra el porcentaje de pérdida de sacarosa por inversión en cada etapa de la evaporación a múltiple efecto del ingenio azucarero en base a la pérdida global en dicha etapa. Los valores se encuentran tabulados en la tabla 7, apéndice C.

Figura 17. **Pérdida porcentual de sacarosa global por inversión en la evaporación a múltiple efecto**



Fuente: elaboración propia, con programa Microsoft Excel 2010.

La figura 17 muestra el porcentaje de pérdida de sacarosa promedio total por inversión estimado por el modelo de Vukov corregido con el modelo de Schäffler. Los valores se encuentran tabulados en la tabla 7, apéndice C.

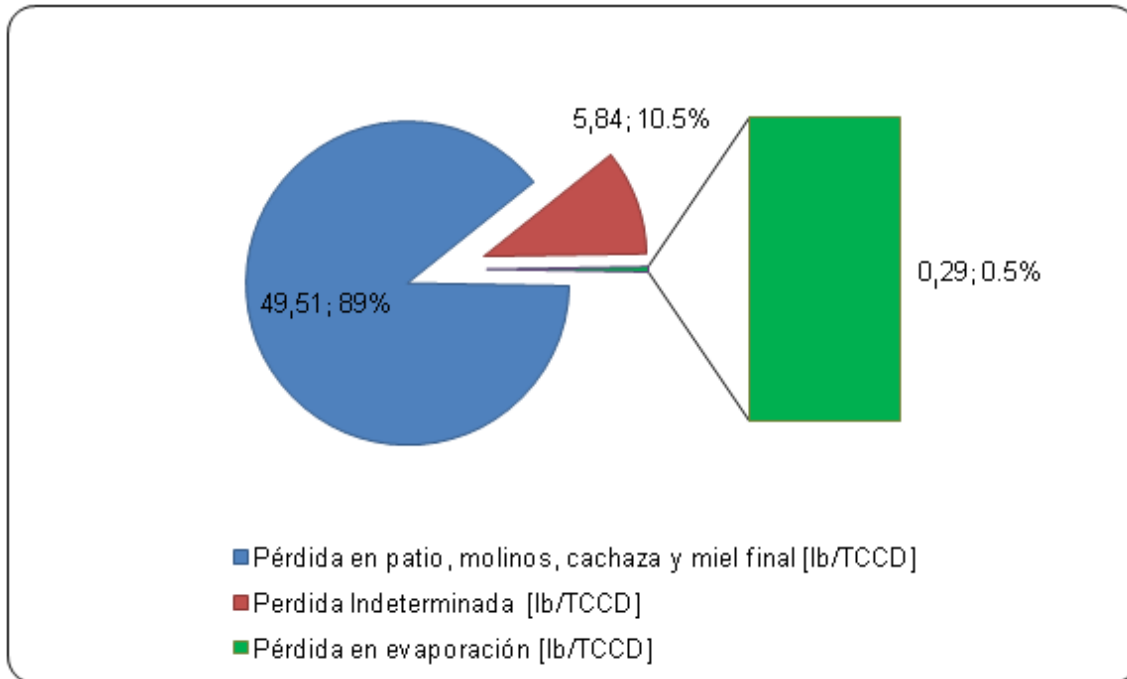
Tabla V. **Costo consecuente a la pérdida de sacarosa global estimada por modelo de Vukov**

Molienda promedio [TCCD]	Pérdida día [US\$/día]	Pérdida día [GTQ/día]	Proyección de pérdida total [GTQ/zafra]
9 362,06	544,81	4 249,54	764 916,57

Fuente: elaboración propia. Reporte diario de laboratorio, ingenio azucarero.

La tabla V muestra el costo monetario día que repercute en ingenio azucarero por la pérdida de sacarosa global promedio, estimada por el modelo de Vukov en la evaporación a múltiple efecto para las mediciones realizadas. Se tomó con base en un precio de venta de US\$ 20,00 por quintal de azúcar y una conversión de GTQ 7,80 por dólar. La proyección se tomó para un periodo zafra de 180 días.

Figura 18. **Comparación de las pérdidas de sacarosa en las distintas etapas del proceso de fabricación**



Fuente: elaboración propia. Reporte diario de laboratorio, ingenio azucarero.

La figura 18 muestra la comparación de las pérdidas de sacarosa del ingenio azucarero para las distintas etapas del proceso, incluyendo la pérdida por inversión estimada en la evaporación a múltiple efecto. Los valores se encuentran tabulados en la tabla 2, anexos.

5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Se tuvo por objetivo estimar las pérdidas por inversión de la sacarosa en la estación de evaporación a múltiple efecto, por medio del modelo matemático de Vukov, utilizando mediciones de pH, temperatura y tiempo de residencia del jugo a la salida de los distintos efectos en la estación.

Para la realización se tomaron muestras de jugo a la salida de cada evaporador en operación, en la línea de producción objeto de estudio del ingenio azucarero. Al momento de la recolección de muestras, se midió el caudal de jugo claro entrando a la estación y se tomó lectura de la temperatura del jugo a la salida de cada vaso en operación.

Posteriormente, se midió el pH y °Brix de cada muestra, corrigiendo el primero a la temperatura de medición con el modelo matemático de Schäffler. Luego, se realizó el balance de masa respectivo a cada corrida y se aplicaron las variables mencionadas arriba al modelo matemático de Vukov, con el que se estimaron las pérdidas por inversión de la sacarosa en cada efecto y finalmente la global de la estación.

En la figura 14, se muestran los resultados de la estimación hecha con la ecuación de Vukov para cada efecto. Los valores representan el porcentaje de sacarosa invertida respecto a la que entró a la evaporación.

En primera instancia se observó que la mayor concentración de sacarosa invertida se dio del primer al tercer efecto. El comportamiento era esperado

pues la temperatura del jugo en dichos efectos, es mayor en comparación con las del cuarto y quinto efecto.

Ahora bien, se observó que la pérdida fue mayor en la primera corrida en comparación con las demás. Esto fenómeno se dio ya que las mediciones de pH fueron las menores en comparación con el resto de corridas. Al corregir las temperaturas con el modelo de Schäffler, el valor de pH disminuyó aún más y “una unidad de reducción en pH lleva a un incremento de 10 veces en la velocidad de inversión a la misma temperatura”¹.

Los valores promedio en la pérdida por inversión estimada fueron 0,127, 0,077 y 0,024 % para el primero, segundo y tercer efecto respectivamente. Los porcentajes para cuarto y quinto efecto resultaron siendo menores al 0,002 % de la sacarosa ingresada a la estación.

En la figura 15, se muestra la comparación entre la pérdida porcentual de sacarosa, estimada con pH medido en laboratorio (curva roja) contra el corregido con modelo Schäffler (curva azul). El área entre curvas fue el primer indicativo visual de la diferencia entre los valores de sacarosa invertida.

La influencia que tuvo la temperatura al corregir el pH de los jugos con el modelo de Schäffler resultó en un aumento en la proporción de sacarosa perdida de 374, 275, 212, 123 y 87 % para el primero, segundo, hasta quinto efecto respectivamente. Dicho comportamiento se manifestó, pues “una disminución en el pH es normalmente esperado cuando los jugos azucarados son calentados”².

¹REIN, Peter. Ingeniería de la caña de azúcar. p. 677.

²SCHÄFFLER, K. Estimation of pH of sugar cane juices at high temperature. p. 14.

Con los valores de aumento en la proporción de las pérdidas, se vio claramente la subestimación de las mismas al utilizar las mediciones de pH a temperatura de laboratorio sin corrección. “El modelo de Vukov requiere un valor de pH a temperatura de operación”³. La utilización del modelo de Schäffler resultó indispensable al momento de estimar las pérdidas por inversión de la sacarosa.

Consecuentemente, se confirmó la influencia de la temperatura en las pérdidas por inversión de la sacarosa al disminuir el pH de los jugos y así aumentar la cinética de reacción.

En la figura 16, se muestra que el 55 % de la pérdida global se da en el primer efecto. Tal comportamiento se dio por las temperaturas más altas a las cuales está expuesto el jugo en dicho efecto.

Para el segundo y tercer efecto, la pérdida respecto a la global, resultó en 34 y 10 % respectivamente. La suma del cuarto y quinto efecto representó el 1 % de la pérdida global en la evaporación. Este valor se dio ya que el jugo se expone a menores temperaturas en los últimos efectos.

La pérdida global se tomó como la suma de los aportes de la sacarosa invertida en cada efecto. De la figura 17, el valor promedio de las corridas realizadas, se estimó en 0,23 % de sacarosa invertida respecto a la que entró a la estación.

En la esquina superior derecha de la figura 17, se aprecian los valores equivalentes de la pérdida porcentual en parámetros de la industria azucarera.

³SCHÄFFLER, K. Estimation of pH of sugar cane juices at high temperature. p. 16.

La pérdida fue entonces 0,29 lb/TCCD o 2,30 kg/t de sacarosa en el jugo crudo. “Schäffler reporta la pérdida desde el jugo clarificado a la meladura normalmente en el rango de 2 a 3 kg/t de sacarosa en el jugo crudo”⁴.

La pérdida global por inversión de la sacarosa estimada por el modelo matemático de Vukov, para las corridas realizadas, resultó entonces dentro del rango normalmente esperado en la literatura.

En la tabla V, se muestra la repercusión monetaria de dicha pérdida, la cual equivale a Q4 250,00 al día. Este valor monetario se determinó con base en la caña molida promedio en los días de recolección de muestras y se representó como la pérdida monetaria de dichos días, por la inversión en la evaporación a múltiple efecto.

Así también, en la tabla V, se muestra el valor de la proyección zafra del impacto monetario. El valor estimado fue de Q764 917,00 para un período zafra de 180 días. Dicho valor reflejó un parámetro a considerar para futuras mediciones en el ingenio azucarero y dio conocimiento del costo estimado consecuente a dichas pérdidas en la evaporación.

Por último, se muestra en la figura 18, la comparación gráfica entre las pérdidas de sacarosa en las distintas etapas del proceso. Las pérdidas en patio, molinos, cachaza y miel final representan el 89 % de la sacarosa perdida en el ingenio azucarero. Del balance, el resto de pérdida, 11 %, representa la pérdida indeterminada.

⁴REIN, Peter. Ingeniería de la caña de azúcar. p. 675.

Sin embargo, de esa pérdida indeterminada, el 0,5 % equivale a la pérdida estimada con Vukov por inversión de la sacarosa en la evaporación a múltiple efecto. El otro 10,5 % sigue siendo de origen desconocido y representa un objeto para estudios posteriores en otras etapas del proceso de obtención de azúcar de caña.

Cabe agregar que pese a ser una pérdida menor al 1 %, representó una pérdida cualitativamente importante para el ingenio azucarero, pues siendo un valor conocido aunque de menor magnitud en comparación con el resto de pérdidas, permitió aislar y reconocer una sección de las pérdidas indeterminadas.

CONCLUSIONES

1. El porcentaje de pérdida por inversión de la sacarosa en cada efecto de la evaporación fue de 0,127, 0,077, 0,024 % para el primero, segundo, tercero efecto respectivamente y 0,002 % para el cuarto y quinto efecto.
2. El mayor porcentaje de sacarosa invertida en la evaporación a múltiple efecto se da en el primero, segundo y tercer efecto.
3. La pérdida por inversión de la sacarosa fue mayor con valores de pH de mayor acidez.
4. La temperatura tiene una influencia definitiva en la estimación de las pérdidas por inversión en la evaporación a múltiple efecto.
5. El pH a temperatura de medición de laboratorio subestima las pérdidas por inversión de la sacarosa, evidenciando el requerimiento del pH a temperatura de operación en el modelo matemático de Vukov.
6. El primer efecto tiene la mayor influencia sobre la inversión de la sacarosa en la estación de evaporación a múltiple efecto.
7. La pérdida global por inversión de la sacarosa en la evaporación a múltiple efecto del ingenio azucarero tiene un valor de 0,29 lb/TCCD.

8. La magnitud de la pérdida de sacarosa en la evaporación a múltiple efecto del ingenio azucarero, está en el rango normalmente esperado con 2,3 kg/TSJC.
9. La repercusión monetaria al ingenio azucarero debido a la pérdida por inversión de la sacarosa en la evaporación a múltiple efecto tiene un valor de Q4 249,54 al día.
10. La pérdida de sacarosa en la evaporación representa el 0,5 % de la pérdida global total del ingenio azucarero.
11. Existe una pérdida cualitativamente importante de sacarosa al paso del jugo a través de la evaporación a múltiple efecto.

RECOMENDACIONES

1. Instalar equipos sumergibles de medición de temperatura para cada evaporador en su respectivo efecto.
2. Implementar un sistema de medición de ° Brix, pH y temperatura del jugo por turnos a la salida de cada evaporador.
3. Corregir el pH reportado en laboratorio a temperatura de operación para la estimación de las pérdidas por inversión en la evaporación a múltiple efecto.
4. Monitorear la presión y temperatura de vapor entrando al primer efecto de la evaporación.
5. Asegurar la utilización de un atemperador de vapor vivo al primer efecto, para evitar sobrecalentamiento del vapor y exposición del jugo a mayores temperaturas.
6. Dar seguimiento durante el período zafra para la detección y aislamiento de otras etapas del proceso con mayor influencia sobre las pérdidas globales de sacarosa.
7. Replicar estudio en otra línea de evaporación del ingenio azucarero.
8. Replicar estudio para etapas de extracción, clarificación y agotamiento del ingenio azucarero en busca de más pérdidas indeterminadas.

BIBLIOGRAFÍA

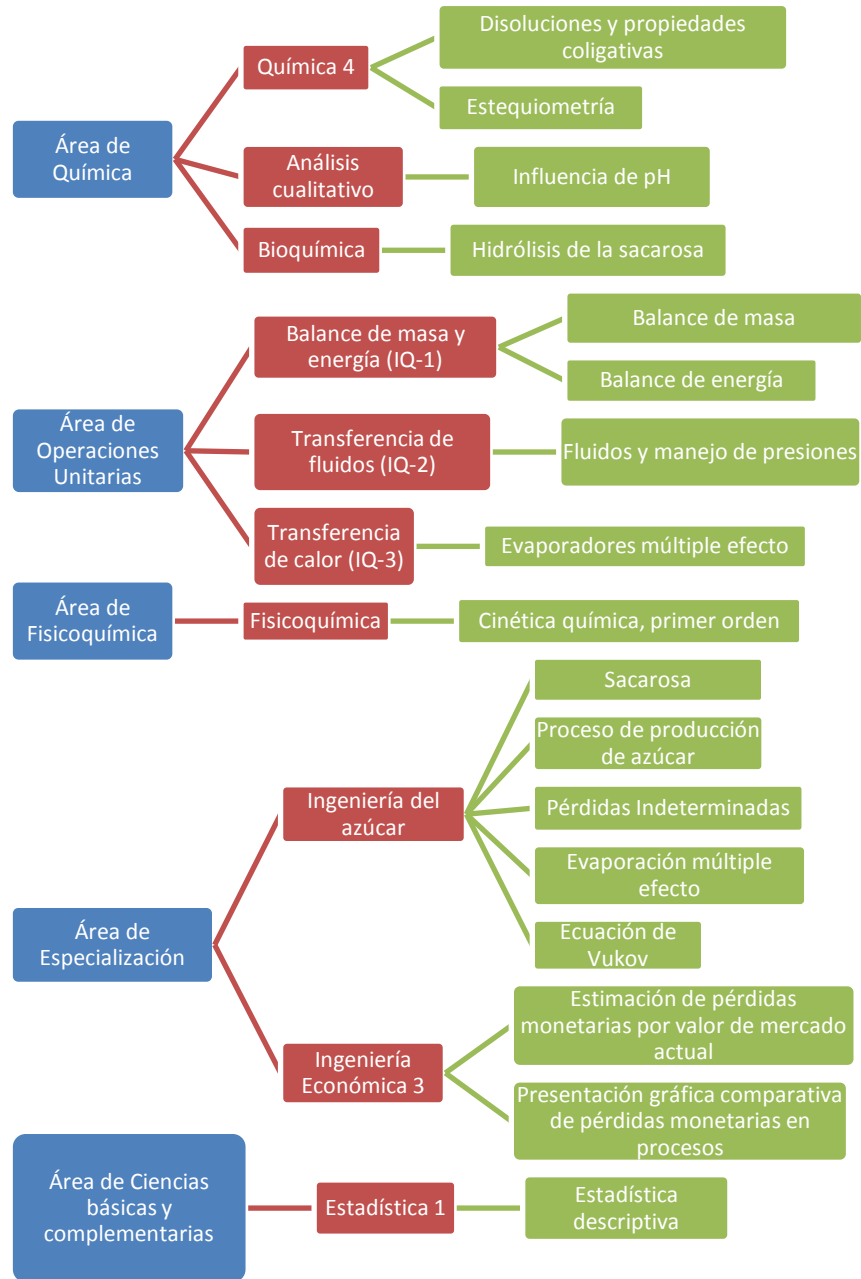
1. HONIG, Pieter. *Principios de la tecnología azucarera*. México: Continental, 1974. 1676 p.
2. HUGOT, Emile. *Manual para ingenieros azucareros*. Ruiz Coutiño, Carlos (trad.). 3a ed. México: Continental, 1986. 1166 p.
3. KERN, Donald Q. *Procesos de transferencia de calor*. México: Continental, 1999. 980 p.
4. PEÑARANDA, Jaime. *Sacarosa, glucosa y fructosa, propiedades*. Guatemala: s.l., 2013. 12 p.
5. RAMÍREZ JUÁREZ, Jennifer. *Determinación de sacarosa invertida por efecto de recirculación de jugo clarificada de caña de azúcar, en un evaporador de placas de película*. Trabajo de graduación de Ing. Química, Universidad San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2011. 107 p.
6. REIN, Peter. *Ingeniería de la caña de azúcar*. Berlín: Dr. Bartens, 2012. 881 p. ISBN: 978-3-87040-142-9.
7. SCHAFFLER, K.J. *Estimation of pH in sugar cane juices at high temperature*. South Africa: Sugar Milling Research Institute, 1987. 5 p.

8. SCHAFFLER, K.J.; MUZELL, D.J.; SCHORN, P.M. *An evaluation of sucrose inversion and monosaccharide degradation across evaporation at Darnall Mill*. Proceedings of the South African Sugar Technologist's Association. South Africa: 1985. 78 p.
9. Sugar Research Institute. Australia: SRI, 2013. [5 p.]
10. VUKOV, K. "Kinetic aspects of sucrose hydrolysis". International Sugar Journal 1965. 175 p.
11. WALPOLE, Ronald E. *Probabilidad y estadística para ingenieros*. 4a ed. México: McGraw-Hill, 1992. 736 p.
12. WRIGHT, Peter. *Introduction to sugar mill technology, notes on mill technology*. Colombia: PGW ProSuTech. 2002. 123 p.

APÉNDICES

Apéndice A:	Tabla de requisitos académicos	52
Apéndice B:	Árbol de problemas.....	53
Apéndice C:	Datos calculados.....	54

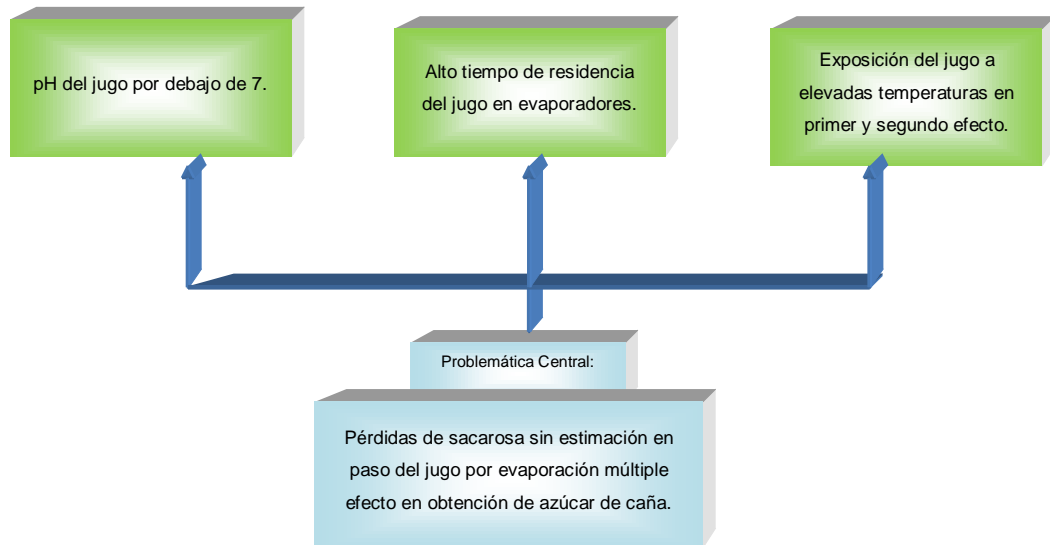
Apéndice A: **Tabla de requisitos académicos**



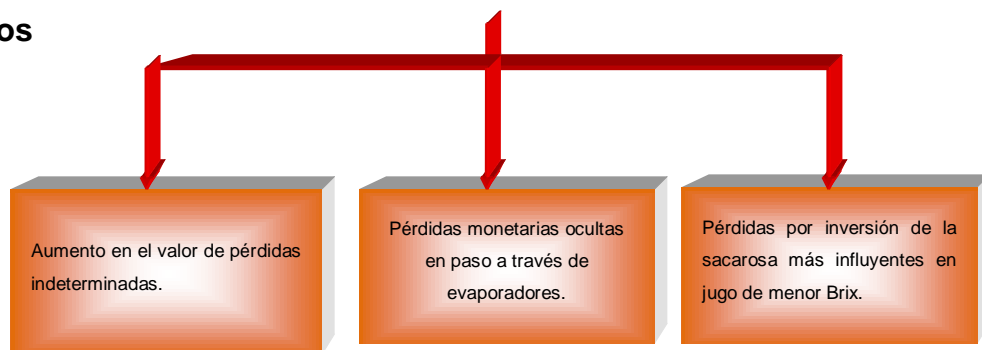
Fuente: elaboración propia, SmartArt de Microsoft Word 2010.

Apéndice B: Árbol de problemas

Causas



Efectos



Fuente: elaboración propia, Formas de Microsoft Word 2010.

Apéndice C: **Datos calculados**

Tabla 1. Datos recopilados del muestreo en evaporadores

Corrida 1					
Análisis	1er Efecto	2do Efecto	3er Efecto	4to Efecto	5to Efecto
Brix	16,93	34,68	44,16	50,00	54,86
pH	5,94	5,95	5,99	5,94	6
Temperatura [°C]	112,5	106	96	81,00	61
Volumen por efecto [L]	14 225	17 163	14 338	6 299	6 234
Corrida 2					
Análisis	1er Efecto	2do Efecto	3er Efecto	4to Efecto	5to Efecto
Brix	19,15	30,32	35,92	40,09	59,79
pH	6,66	6,45	6,41	6,30	6,505
Temperatura [°C]	114,5	106	97,5	80,00	62
Volumen por efecto [L]	14 225	17 163	10 130	5 775	12 533
Corrida 3					
Análisis	1er Efecto	2do Efecto	3er Efecto	4to Efecto	5to Efecto
Brix	22,99	36,03	44,56	50,91	72,93
pH	6,79	6,55	6,39	6,34	6,37
Temperatura [°C]	112,5	106	98	78,00	61
Volumen por efecto [L]	14 225	17 163	10 130	5 775	12 533
Corrida 4					
Análisis	1er Efecto	2do Efecto	3er Efecto	4to Efecto	5to Efecto
Brix	18,91	28,42	34,44	37,12	58,8
pH	7,20	6,93	6,88	6,72	6,755
Temperatura [°C]	114	105	97,5	80,00	60
Volumen por efecto [L]	14 225	17 163	10 130	5 775	12 533

Fuente: elaboración propia.

Tabla 2. Condiciones del jugo claro

Corrida	Presión de escape [PSIG]	Cauda [gpm]	Caudal [L/min]	Brix	Pol	pH	Temperatura [°C]	Densidad jugo [kg/L]	Flujo de masa [kg/min]
1	20	902	3 417,30	15,9	14,01	7,4	110,00	1,01	3 434,76
2	20	875	3 315,01	14,2	13,4	7,1	113,00	1,00	3 304,77
3	20	947	3 587,79	16,3	13,93	6,9	106,67	1,01	3 619,92
4	20	910	3 447,61	15,1	14,88	7,4	107,22	1,00	3 463,10

Fuente: elaboración propia.

Tabla 3. Balance de evaporación y datos calculados en corrida 1

Variable	1er Efecto	2do Efecto	3er Efecto	4to Efecto	5to Efecto
Densidad jugo [kg/L]	1,01	1,07	1,11	1,14	1,17
Flujo de masa [kg/min]	3 224,72	3 117,20	2 447,67	2 161,78	1 970,27
Flujo de vapor [kg/min]	210,04	107,52	669,53	285,89	191,51
Caudal salida [L/min]	3 203,11	2 904,49	2 197,59	1 889,06	1 679,49
Volumen ocupado [L]	14 225	17 163	14 338	6 299	6 234
Tiempo residencia [min]	4,44	5,91	6,52	3,33	3,71
pH @ T lab	5,94	5,95	5,99	5,94	6,00
logK con pH medido	-3,81	-4,15	-4,65	-5,28	-6,33
K con pH medido [min ⁻¹]	1,57E-04	7,10E-05	2,24E-05	5,22E-06	4,63E-07
Pérdida con pH medido [%]	0,07	0,04	0,0146	0,0017	0,0002
Pérdida por efecto con pH medido [%]	54,32	32,76	11,43	1,36	0,13
dpH/dT	-0,0048	-0,0048	-0,0051	-0,0048	-0,0051
pH Schöffler	5,52	5,56	5,63	5,67	5,82
logK Schöffler	-3,39	-3,76	-4,29	-5,01	-6,15
K Schöffler [min ⁻¹]	4,08E-04	1,75E-04	5,13E-05	9,66E-06	7,06E-07
Pérdida Schöffler [%]	0,18	0,10	0,03	0,003	0,0003
Pérdida por efecto Schöffler [%]	56,37	32,13	10,41	1,00	0,08

Fuente: elaboración propia.

Tabla 4. Balance de evaporación y datos calculados en corrida 2

Variable	1er Efecto	2do Efecto	3er Efecto	4to Efecto	5to Efecto
Densidad jugo [kg/L]	1,01	1,06	1,08	1,11	1,19
Flujo de masa [kg/min]	2 446,00	2 129,57	1 797,52	1 610,32	1 079,74
Flujo de vapor [kg/min]	858,77	316,43	332,05	187,19	530,58
Caudal salida [L/min]	2 415,02	2 012,83	1 658,69	1 450,91	907,12
Volumen ocupado [L]	14 225	17 163	10 130	5 775	12 533
Tiempo residencia [min]	5,89	8,53	6,11	3,98	13,82
pH @ T lab	6,66	6,45	6,41	6,30	6,51
logK con pH medido	-4,46	-4,63	-4,96	-5,62	-6,83
K con pH medido [min ⁻¹]	3,48E-05	2,36E-05	1,11E-05	2,38E-06	1,47E-07
Pérdida con pH medido [%]	0,02	0,02	0,0068	0,0009	0,0002
Pérdida por efecto con pH medido [%]	42,23	41,47	13,93	1,95	0,42
dpH/Dt	-0,0094	-0,0079	-0,0076	-0,0069	-0,0083
pH Schäffler	5,82	5,81	5,86	5,92	6,20
logK Schäffler	-3,62	-3,99	-4,40	-5,24	-6,53
K Schäffler [min ⁻¹]	2,40E-04	1,03E-04	3,94E-05	5,69E-06	2,97E-07
Pérdida Schäffler [%]	0,14	0,09	0,02	0,002	0,0004
Pérdida por efecto Schäffler [%]	55,30	34,24	9,42	0,89	0,16

Fuente: elaboración propia.

Tabla 5. Balance de evaporación y datos calculados en corrida 3

Variable	1er Efecto	2do Efecto	3er Efecto	4to Efecto	5to Efecto
Densidad jugo [kg/L]	1,03	1,08	1,11	1,15	1,24
Flujo de masa [kg/min]	2 563,39	2 181,10	1 763,53	1 543,39	1 077,39
Flujo de vapor [kg/min]	1 056,53	382,29	417,57	220,14	466,00
Caudal salida [L/min]	2 494,42	2 023,35	1 583,35	1 342,73	869,95
Volumen ocupado [L]	14 225	17 163	10 130	5 775	12 533
Tiempo residencia [min]	5,70	8,48	6,40	4,30	14,41
pH @ T lab	6,79	6,55	6,39	6,34	6,37
logK con pH medido	-4,68	-4,75	-4,97	-5,83	-6,90
K con pH medido [min ⁻¹]	2,09E-05	1,77E-05	1,08E-05	1,49E-06	1,25E-07
Pérdida con pH medido [%]	0,01	0,02	0,0069	0,0006	0,0002
Pérdida por efecto con pH medido [%]	34,38	43,34	19,91	1,85	0,52
dpH/dT	-0,0104	-0,0085	-0,0075	-0,0071	-0,0073
pH Schäffler	5,88	5,85	5,85	5,96	6,11
logK Schäffler	-3,77	-4,06	-4,42	-5,45	-6,64
K Schäffler [min ⁻¹]	1,70E-04	8,74E-05	3,79E-05	3,57E-06	2,30E-07
Pérdida Schäffler [%]	0,10	0,07	0,02	0,002	0,0003
Pérdida por efecto Schäffler [%]	49,12	37,62	12,31	0,78	0,17

Fuente: elaboración propia.

Tabla 6. Balance de evaporación y datos calculados en corrida 4

Variable	1er Efecto	2do Efecto	3er Efecto	4to Efecto	5to Efecto
Densidad jugo [kg/L]	1,01	1,05	1,08	1,10	1,19
Flujo de masa [kg/min]	2 765,35	2 531,95	2 089,31	1 938,19	1 223,56
Flujo de vapor [kg/min]	697,75	233,40	442,64	151,13	714,62
Caudal salida [L/min]	2 731,46	2 406,53	1 937,21	1 762,91	1 030,12
Volumen ocupado [L]	14 225	17 163	10 130	5 775	12 533
Tiempo residencia [min]	5,21	7,13	5,23	3,28	12,17
pH @ T lab	7,20	6,93	6,88	6,72	6,76
logK con pH medido	-5,02	-5,13	-5,42	-6,03	-7,17
K con pH medido [min ⁻¹]	9,63E-06	7,38E-06	3,82E-06	9,42E-07	6,69E-08
Pérdida con pH medido [%]	0,01	0,01	0,0020	0,0003	0,0001
Pérdida por efecto con pH medido [%]	39,62	41,53	15,77	2,44	0,64
dpH/dT	-0,0140	-0,0115	-0,0112	-0,0099	-0,0101
pH Schäßler	5,95	6,00	6,07	6,18	6,40
logK Schäßler	-3,77	-4,21	-4,61	-5,48	-6,82
K Schäßler [min ⁻¹]	1,69E-04	6,19E-05	2,46E-05	3,29E-06	1,51E-07
Pérdida Schäßler [%]	0,09	0,04	0,01	0,001	0,0002
Pérdida por efecto Schäßler [%]	60,16	30,17	8,81	0,74	0,13

Fuente: elaboración propia.

Tabla 7. Valores promedio de los resultados por balance

Efecto	Pérdida sacarosa [%]	Proporción de aumento en la pérdida por corrección del pH [%]	Magnitud de influencia en la pérdida por efecto [%]
1er efecto	0,127	374	55
2do efecto	0,077	275	34
3er efecto	0,024	212	10
4to efecto	0,002	123	1
5to efecto	0,000	87	0

Fuente: elaboración propia.

ANEXOS

Tabla 1. Valores Balance y pérdidas de sacarosa del ingenio azucarero para periodo de prueba

Molienda [TCCD]	9 362,06
Sacarosa entrando [lb/TCCD]	251,28
Perdida miel final [lb/TCCD]	23,74
Perdida Cachaza [lb/TCCD]	2,03
Perdida Indeterminada [lb/TCCD]	6,13
Perdida bagazo [lb/TCCD]	19,75
Perdida patio [lb/TCCD]	4,00
Pérdida total [lb/TCCD]	55,65
Recobrado [lb/TCCD]	195,63

Fuente: reportes de laboratorio, ingenio azucarero.

Tabla 1. Balance y pérdidas de sacarosa del ingenio azucarero para período de prueba con pérdida en evaporación

Molienda [TCCD]	9 362,06
Sacarosa entrando [lb/TCCD]	251,28
Perdida miel final [lb/TCCD]	23,74
Perdida Cachaza [lb/TCCD]	2,03
Perdida Indeterminada [lb/TCCD]	5,84
Perdida bagazo [lb/TCCD]	19,75
Perdida patio [lb/TCCD]	4,00
Pérdida en evaporación [lb/TCCD]	0,29
Pérdida total [lb/TCCD]	55,65
Recobrado [lb/TCCD]	195,63

Fuente: elaboración propia.

