



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

**EVALUACIÓN COMPARATIVA TÉCNICA Y ECONÓMICA DE LOS  
MÉTODOS DE LIMPIEZA HIDROCINÉTICA Y LIMPIEZA QUÍMICA PARA  
EVAPORADORES TIPO ROBERTS EN INGENIOS AZUCAREROS**

**Mario José Linares Morales**

Asesorado por el Ing. David Ricardo Cerezo Toledo

Guatemala, julio de 2014

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**EVALUACIÓN COMPARATIVA TÉCNICA Y ECONÓMICA DE LOS  
MÉTODOS DE LIMPIEZA HIDROCINÉTICA Y LIMPIEZA QUÍMICA PARA  
EVAPORADORES TIPO ROBERTS EN INGENIOS AZUCAREROS**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**MARIO JOSÉ LINARES MORALES**

ASESORADO POR EL ING. DAVID RICARDO CEREZO TOLEDO

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO QUÍMICO**

GUATEMALA, JULIO DE 2014

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. Narda Lucía Pacay Barrientos
VOCAL V	Br. Walter Rafael Véliz Muñoz
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. César Alfonso García Guerra
EXAMINADOR	Ing. Otto Raúl de León de paz
EXAMINADOR	Ing. Jorge Emilio Godínez Lemus
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:

### **EVALUACIÓN COMPARATIVA TÉCNICA Y ECONÓMICA DE LOS MÉTODOS DE LIMPIEZA HIDROCINÉTICA Y LIMPIEZA QUÍMICA PARA EVAPORADORES TIPO ROBERTS EN INGENIOS AZUCAREROS**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha 2 de noviembre de 2011.



**Mario José Linares Morales**

Guatemala, 3 de abril de 2014

Ingeniero  
Victor Manuel Monzón Valdez  
Director  
Escuela de Ingeniería Química USAC  
Presente

Asunto: Aprobación del Informe Final del Trabajo de Graduación.

Estimado Ingeniero Victor Manuel Monzón Valdez

Reciba un cordial saludo, el motivo de la presente es para hacer de su conocimiento que apruebo el informe final de trabajo de graduación: **"Evaluación Comparativa Técnica y Económica de los Métodos de Limpieza Hidrocinética y Limpieza Química para Evaporadores Tipo Roberts en Ingenios Azucareros"** elaborado por el estudiante Mario José Linares Morales, con número de carnet 200611281.

En tal sentido, agradezco su atención a la presente.

Sin otro particular, me despido de usted.

Atentamente

**David Ricardo Cerezo Toledo**  
Ingeniero Químico  
Colegiado 1169

Ing. David Ricardo Cerezo Toledo  
Col. No. 1169



Guatemala, 06 de mayo de 2014  
Ref. EIQ.TG-IF.015.2014

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

Estimado Ingeniero Monzón:

Como consta en el registro de evaluación del informe final EIQ-PRO-REG-007 correlativo 264-2011 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: **Mario José Linares Morales**.  
Identificado con número de carné: 2006-11281.

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:

### EVALUACIÓN COMPARATIVA TÉCNICA Y ECONÓMICA DE LOS MÉTODOS DE LIMPIEZA HIDROCINÉTICA Y LIMPIEZA QUÍMICA PARA EVAPORADORES TIPO ROBERTS EN INGENIOS AZUCAREROS

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por el Ingeniero Químico: **David Ricardo Cerezo Toledo**.

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. Estuardo Edmundo Monroy Benítez  
COORDINADOR DE TERNA  
Tribunal de Revisión  
Trabajo de Graduación

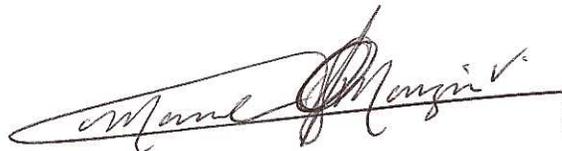


C.c.: archivo



Ref.EIQ.TG.140.2014

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, **MARIO JOSÉ LINARES MORALES** titulado: **"EVALUACIÓN COMPARATIVA TÉCNICA Y ECONÓMICA DE LOS MÉTODOS DE LIMPIEZA HIDROCINÉTICA Y LIMPIEZA QUÍMICA PARA EVAPORADORES TIPO ROBERTS EN INGENIOS AZUCAREROS"**.  
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, julio 2014

Cc: Archivo  
VMMV/ale



Universidad de San Carlos  
de Guatemala



Facultad de Ingeniería  
Decanato

DTG. 367.2014

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: **EVALUACIÓN COMPARATIVA TÉCNICA Y ECONÓMICA DE LOS MÉTODOS DE LIMPIEZA HIDROCINÉTICA Y LIMPIEZA QUÍMICA PARA EVAPORADORES TIPO ROBERTS EN INGENIOS AZUCAREROS**, presentado por el estudiante universitario **Mario José Linares Morales**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos  
Decano

Guatemala, 31 de julio de 2014

/gdech



## **ACTO QUE DEDICO A:**

<b>Dios</b>	Por ser una importante influencia en mi carrera.
<b>Mis padres</b>	Elizabeth Beatriz Morales Linares y Juan José Linares Sagastume, por su apoyo incondicional.
<b>A mi abuela</b>	Zoila Leonor Linares Viuda de Morales, a quien dedico de forma especial esta investigación.
<b>Mis hermanos</b>	Jorge Luis Linares Morales, Lesly Patricia Linares Girón.
<b>Mis tías</b>	Elvira de Jesús Morales de Martínez y Gladis Marina Morales Linares.
<b>A mis primos</b>	Sergio Antonio Morales Linares y Josué Israel Juárez Morales (q.e.p.d.).

## **AGRADECIMIENTOS A:**

<b>La Universidad de San Carlos de Guatemala</b>	Por ser fuente del desarrollo intelectual y profesional.
<b>Mis amigos de la Facultad</b>	Karen Hurtarte, Corina González, Adrián Morales, Doris Vega, Eddy Solares, Manuel Solares, Alison Ixcot, Carol Juárez, Lucía Montufar, Andrea Fong, Elías Bámaca, William Xil, por hacer mi paso por la universidad una experiencia memorable.
<b>Ingeniero</b>	Otto Miguel Hurtarte Pineda, amigo y ejemplo a seguir.
<b>Ingeniero</b>	José Adolfo Tuna Aguilar, mi catedrático y amigo.
<b>Ingeniero</b>	Mario José Mérida Meré, por darme la oportunidad de desarrollarme profesionalmente.
<b>Ingeniera</b>	Telma Maricela Cano Morales, por las lecciones de vida que me ha dado.
<b>Mi asesor</b>	Ingeniero David Ricardo Cerezo Toledo, por el apoyo en el desarrollo de esta investigación.

# ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES .....	V
LISTA DE SÍMBOLOS .....	IX
GLOSARIO .....	XI
RESUMEN .....	XV
OBJETIVOS.....	XVII
INTRODUCCIÓN .....	XIX
1. ANTECEDENTES.....	1
2. MARCO TEÓRICO.....	3
2.1. Ingenio de azúcar .....	3
2.1.1. Aspectos generales de un ingenio azucarero en Guatemala .....	3
2.1.2. Funcionamiento y componentes de un ingenio azucarero .....	5
2.1.3. Campo y batey .....	6
2.1.4. Extracción del jugo.....	7
2.1.5. Preparación del jugo .....	10
2.1.6. Calentamiento y clarificación .....	10
2.1.7. Estación de evaporadores .....	12
2.1.8. Estación de tachos.....	13
2.1.9. Centrifugado y secado .....	16
2.1.10. Producción de vapor y energía eléctrica .....	18
2.2. Evaporador .....	20
2.2.1. Evaporación química .....	20

2.2.2.	Ausencia de purgas.....	20
2.2.3.	Evaporadores de tubos horizontales .....	22
2.2.4.	Evaporadores de calandria.....	24
2.2.5.	Evaporadores de canasta.....	27
2.2.6.	Evaporadores de tubos verticales largos .....	28
2.2.7.	Evaporadores de circulación forzada .....	29
2.3.	Incrustación en evaporadores .....	31
2.3.1.	Factor de suciedad.....	31
2.4.	Limpieza hidrocínética de evaporadores .....	32
2.4.1.	Aplicaciones de sistemas con hidrocínética .....	33
2.4.2.	Funcionamiento del equipo .....	33
2.4.3.	Bomba de alta presión .....	34
2.4.4.	Cuerpo mecánico .....	34
2.4.5.	Cuerpo hidráulico .....	35
2.4.6.	Tablero de control y PLC.....	36
2.4.7.	Accesorios para hidrocínética.....	36
2.4.7.1.	Manguera principal.....	37
2.4.7.2.	Tipos de red fija.....	39
2.4.7.3.	Conexiones para alta presión.....	40
2.4.7.4.	Divisor de flujo.....	40
2.4.7.5.	Mangueras de limpieza .....	41
2.4.7.6.	<i>Tubejet</i> .....	42
2.4.7.7.	Boquillas rotativas .....	43
2.4.7.8.	Boquillas línea T.....	44
2.4.7.9.	Boquilla línea B .....	45
2.5.	Aplicaciones de la limpieza hidrocínética en la industria azucarera .....	46
2.5.1.	Limpieza en preevaporadores y evaporadores .....	46
2.6.	Seguridad en la limpieza hidrocínética de evaporadores .....	47

2.7.	Limpieza química de evaporadores .....	49
2.7.1.	Procedimiento de limpieza química .....	49
2.8.	Ingeniería económica.....	51
2.8.1.	Análisis y selección de inversiones .....	51
2.8.2.	Criterio del VAN (Valor Actual Neto o valor capital) ..	52
2.8.3.	Criterio de la TIR (Tasa Interna de Rentabilidad, criterio de retorno o Tasa de Rendimiento Interno)...	52
2.8.4.	Tasa Interna de Rentabilidad Modificada.....	53
2.8.5.	Otros criterios para seleccionar inversiones .....	54
2.8.6.	Plazo de recuperación o <i>PAY-BACK</i> .....	54
2.8.7.	Tasa de rendimiento contable.....	54
3.	DISEÑO METODOLÓGICO .....	55
3.1.	Variables.....	55
3.1.1.	Variables de control .....	55
3.1.2.	Variables de control independientes .....	56
3.1.3.	Variables de control dependientes.....	57
3.2.	Delimitación del campo de estudio .....	57
3.3.	Recurso humano disponible .....	58
3.4.	Recursos materiales disponibles .....	58
3.4.1.	Materiales y equipo.....	59
3.4.2.	Presupuesto.....	60
3.5.	Recolección y ordenamiento de la información .....	61
3.6.	Procedimiento para poder realizar el estudio económico. ....	61
3.7.	Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información ..	61
4.	RESULTADOS .....	67
5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	73

CONCLUSIONES.....	79
RECOMENDACIÓN .....	81
BIBLIOGRAFÍA .....	83
APÉNDICES.....	87

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1.	Instalación típica de cuchillas y tipos de cuchillas. ....	8
2.	Construcción típica de un molino. ....	9
3.	Sección de un calentador típico de guarapo. ....	10
4.	Clarificador tipo Dorr – Oliver 444 Rapidorr.....	11
5.	Esquema de funcionamiento de un filtro rotativo al vacío. ....	11
6.	Evaporador normal de cuádruple efecto.....	13
7.	Tacho al vacío. ....	14
8.	Esquema de un cristalizador. ....	15
9.	Corte transversal de una centrífuga. ....	17
10.	Evaporador químico de cuádruple efecto arreglado para flujo paralelo y flujo contra corriente, alimentación en paralelo.....	21
11.	Alimentación en contracorriente .....	21
12.	Evaporador de tubos horizontales .....	24
13.	Evaporador de calandria .....	25
14.	Colocación típica de los deflectores en una calandria. Las flechas indican la dirección del flujo. Las áreas sombreadas indican la colocación de las purgas de no-condensables.....	26
15.	Trampa con salida inferior y trampa con salida superior .....	26
16.	Evaporador de canasta .....	27
17.	Evaporador de tubos verticales largos .....	28
18.	Evaporador de tubos largos con recirculador y evaporador de circulación forzada con elemento calefactor vertical. ....	30
19.	Evaporador de circulación forzada con elemento calefactor interno. ...	30

20.	Evaporador de circulación forzada con elemento calefactor externo horizontal.....	31
21.	Incrustaciones en tubos.....	32
22.	Unidad de alta presión.....	34
23.	Mangueras para limpieza hidrocínética.....	38
24.	Diagrama de uso del equipo.....	38
25.	Isométrico de red fija.....	39
26.	Conexiones diversas.....	40
27.	Divisor de flujo.....	41
28.	Lanza rígida.....	42
29.	<i>Tubejet</i> .....	43
30.	Boquillas línea T.....	44
31.	Bico T.....	45
32.	Boquilla línea B.....	45
33.	Equipo de seguridad.....	48
34.	Costo mensual de la utilización de la limpieza hidrocínética incluyendo inversión inicial.....	67
35.	Costo mensual de limpieza química.....	68
36.	Gráfica comparativa de costos de limpieza hidrocínética y química.....	69
37.	Comparación VPN para técnicas de limpieza química e hidrocínética.....	70
38.	Comparación gráfica de horas de trabajo para limpieza hidrocínética y química.....	71
39.	Diferencia de costos de operación por zafra para la limpieza química e hidrocínética.....	72

## TABLAS

I.	Definición operacional de variables.....	55
II.	Definición operacional de variables independientes para los dos tipos de limpieza en estudio .....	56
III.	Definición operacional de las variables dependientes para los dos tipos de limpieza en estudio .....	57
IV.	Materiales y equipo disponible para la investigación.....	59
V.	Presupuesto .....	60
VI.	Tablas de datos calculados.....	62
VII.	Costo mensual de limpieza hidrocínética, incluyendo inversión inicial .....	63
VIII.	Cálculo de costo energético del equipo hidrocínético.....	64
IX.	Costo mensual limpieza química.....	64
X.	Cálculo de Valor Presente Neto limpieza química .....	64
XI.	Comparación de Valor Presente Neto.....	65
XII.	Tabla comparativa del comportamiento mensual para las dos técnicas de limpieza .....	65
XIII.	Tiempos de limpieza para un evaporador por técnica.....	66



## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
Ø	Diametro
\$	Dólares
<b>Brix</b>	Grados Brix, porcentaje de sacarosa en agua
<b>h</b>	Horas
<b>kg</b>	Kilogramo
<b>kW</b>	Kilowatts
<	Menor que
<b>m</b>	Metro
>	Mayor que
<b>mm</b>	Milimetro
<b>lb</b>	Libra
<b>Lt</b>	Litros
<b>pH</b>	Logaritmo negativo en base 10 de la actividad de los iones hidrógeno
<b>W</b>	Peso
‘	Pie
%	Porcentaje
<b>Bar</b>	Presión en bares
<b>psi</b>	Presión en libras sobre pulgada cuadrada
<b>pulg</b>	Pulgada
‘ ‘	Pulgada
<b>rpm</b>	Revoluciones por minuto
<b>Q</b>	Quetzales



## GLOSARIO

<b>Ácido sulfámico</b>	Ácido inorgánico fuerte, sólido, no volátil, no inflamable, no explosivo y no higroscópico, fórmula $\text{NH}_2\text{SO}_3\text{H}$ .
<b>Bagazo</b>	Se denomina bagazo al residuo de materia después de extraído su jugo.
<b>Batch</b>	Se conoce como sistema por lotes (en inglés <i>batch processing</i> ), o modo <i>batch</i> , a la ejecución de un programa sin el control o supervisión directa del usuario.
<b>Booster bomba</b>	Bomba reforzadora, se utilizan para aumentar la presión del agua en lugares donde es insuficiente.
<b>Calizas</b>	La caliza es una roca sedimentaria compuesta mayoritariamente por carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ), generalmente calcita.
<b>Carbonilla</b>	Partículas de carbón a medio quemar.
<b>Consumibles</b>	Conjunto de materiales que se utilizan o consumen regularmente en los procesos de producción o ventas pero que no se emplean en el propio producto, por ejemplo, el aceite de engrasar, las varillas de soldar,

el material de mantenimiento, los materiales de limpieza, los combustibles., Y que precisan de un aprovisionamiento periódico.

**Diésel** Referido al combustible. Diésel es un sinónimo de gasóleo.

**Evaporador** Se conoce por evaporador al intercambiador de calor donde se produce la transferencia de energía térmica desde un medio a ser enfriado hacia el fluido refrigerante que circula en el interior del dispositivo. Su nombre proviene del cambio de estado sufrido por el refrigerante al recibir esta energía, luego de una brusca expansión que reduce su temperatura. Durante el proceso de evaporación, el fluido pasa del estado líquido al gaseoso.

**Incrustación** Acción y el efecto de cubrirse una roca, un animal, o un vegetal, con una costra de sustancia mineral abandonada por el agua que la contiene en disolución.

**Limpieza hidrocínética** Es la utilización de la fuerza del agua presurizada para quebrar o quitar materiales indeseados que se agregan en superficies planas o curvas, impidiendo el buen funcionamiento de instalaciones industriales.

**Manómetro** Instrumento que mide la presión.

<b>PLC</b>	Un contador lógico programable se define como un dispositivo electrónico digital que una memoria programable para guardar instrucciones y llevar a cabo funciones lógicas de configuración de secuencia, de sincronización, de conteo y aritméticas, para el control de maquinaria y procesos
<b>Resistencia térmica</b>	Representa la capacidad del material de oponerse al flujo del calor.
<b>TIR</b>	La Tasa Interna de Retorno o Tasa Interna de Rentabilidad (TIR) de una inversión, es el promedio geométrico de los rendimientos futuros esperados de dicha inversión, y que implica por cierto el supuesto de una oportunidad para reinvertir.
<b>Trapiche</b>	Es un molino utilizado para extraer el jugo de determinados frutos de la tierra, como la aceituna o la caña de azúcar.
<b>VAN</b>	El Valor Actual Neto, también conocido como Valor Actualizado Neto o Valor Presente Neto (en inglés <i>net present value</i> ), cuyo acrónimo es VAN (en inglés, NPV), es un procedimiento que permite calcular el valor presente de un determinado número de flujos de caja futuros, originados por una inversión.
<b>Zafra</b>	Cosecha de la caña de azúcar.



## RESUMEN

En la presente investigación se realiza una evaluación comparativa técnica y económicamente de dos métodos para la limpieza de evaporadores tipo Roberts. Los métodos en cuestión son limpieza química de evaporadores y limpieza hidrocínética de evaporadores.

El objetivo de la investigación es evaluar comparativamente los dos métodos y determinar cuál de ellos es más eficiente y posee mejores ventajas económicas.

La limpieza química de evaporadores utiliza grandes cantidades de agua, hidróxido de sodio, ácido sulfámico, energía en forma de calor y una cantidad de tiempo considerable de trabajo; con el objeto de quebrar o quitar los materiales indeseados que se encuentran en las superficies planas y curvas de los evaporadores.

La limpieza hidrocínética de evaporadores es la utilización de la fuerza del agua presurizada, para quebrar o quitar materiales indeseados; que al agregarse en superficies planas o curvas impiden el buen funcionamiento de instalaciones industriales.

Se recopiló información acerca de las dos técnicas de limpieza de evaporadores en ingenios de la región. Dicha información se ordenó, analizó y graficó con el fin de demostrar las ventajas de la limpieza hidrocínética de evaporadores tipo Roberts, todo esto utilizando las herramientas que provee la ingeniería económica.



# OBJETIVOS

## General

Evaluar comparativamente el método de limpieza hidrocínética y el método de limpieza química para determinar los beneficios económicos de cada uno y demostrar cuál de los dos métodos es el óptimo recomendable.

## Específicos

1. Evaluar técnicamente la limpieza específicamente en evaporadores tipo Roberts para ambos métodos.
2. Determinar el tiempo de limpieza de los evaporadores tipo Roberts, por medio del método de limpieza hidrocínética.
3. Determinar el tiempo de limpieza de los evaporadores tipo Roberts, por medio del método de limpieza química.
4. Evaluar por medio de un método de costo beneficio la rentabilidad de la limpieza de los evaporadores tipo Roberts para ambos métodos e indicar cuál de éstos es el más viable.



## INTRODUCCIÓN

El ingeniero químico tiene como función velar por la optimización de los procesos químicos, con el objeto de poder obtener productos acorde a las normas internacionales, todo esto al menor costo posible.

Con relación al proceso de producción de azúcar y enfocando el estudio en los equipos para evaporación de jugo, denominados evaporadores tipo Roberts o de tubos largos; se demostró la ventajas de la limpieza hidrocínética en comparación con la limpieza química de evaporadores tipo Roberts.

Debido a que, después de realizar su función de evaporación del jugo de caña durante la zafra, los evaporadores requieren un servicio de limpieza para retirar las incrustaciones que quedan en las partes lisas del evaporador, existen dos métodos que pueden ser aplicados: el primero y de más uso en los ingenios de la región, es la técnica de limpieza química de evaporadores. Éste es un método que necesita una cantidad grande de energía, tiempo y además utiliza químicos como el hidróxido de sodio y ácido sulfámico. También existe otro método denominado limpieza hidrocínética de evaporadores, que consiste en un equipo que retira las incrustaciones con agua a alta presión, no utiliza ácido y disminuye el uso del hidróxido en un diez por ciento en la limpieza y reduce considerablemente el tiempo de limpieza.

El presente estudio se tuvo como objetivo demostrar la viabilidad económica de la limpieza hidrocínética de evaporadores, para presentarla como método sustituto de la técnica de limpieza química.

Se procedió a recopilar la información necesaria acerca del funcionamiento de cada método de limpieza, información en la que se incluyó gasto energético, mano de obra, depreciación del equipo, costo del equipo de limpieza, tiempo de trabajo e impacto ambiental entre otros.

La información recopilada se encontró en forma de historial y fue adquirida en los ingenios de la región, con la ayuda de la empresa Codimerca`s pc, la cual se encarga de asesoramiento en automatización de procesos químicos.

La información fue ordenada y analizada de forma adecuada utilizando como herramienta la ingeniería económica. Se compararon los dos métodos en estudio; logrando así demostrar la ventaja de la utilización de la técnica de limpieza hidrocínética de evaporadores tipo Roberts frente a la técnica de limpieza química.

## 1. ANTECEDENTES

Estudios previos que evaluaron la optimización de un método de limpieza de equipos utilizados para procesos químicos, en los cuales se busca mejorar la eficiencia, economía, así como disminuir la contaminación ambiental.

- En 2000, Oscar Manuel Morales Santa María, realiza la presentación de resultados de su investigación de trabajo de graduación: *Optimización del método de limpieza en el lugar, de la llenadora de una línea de embotellado de una planta industrial de bebidas carbonatadas.*
- En 2006, Juan José Castro Pú, realiza la presentación de resultados de su investigación de trabajo de graduación: *Establecimiento de controles, para el procedimiento y operación del sistema de limpieza CIP, en la planta de producción de jugos y refrescos, S. A.*
- En 2008, Claudia Lorena Ramírez flores, realiza la presentación de resultados de su investigación de trabajo de graduación: *Evaluación y diseño de un sistema de limpieza subcontratado en la planta de producción de pastas alimenticias.*



## **2. MARCO TEÓRICO**

### **2.1. Ingenio de azúcar**

Es un molino o fábrica de azúcar de caña, en la cual los ingredientes para la fabricación son la caña de azúcar en cualquiera de sus variedades, agua, azufre y otros componentes químicos.

#### **2.1.1. Aspectos generales de un ingenio azucarero en Guatemala**

El proceso de la producción del azúcar comienza desde la siembra de la semilla de caña. A continuación, se le da mantenimiento o cuidado a la plantación mediante insecticidas y limpiezas periódicas, así como un chequeo del crecimiento, seguidamente se pueden tomar muestras de la caña para saber sus grados Brix y polarización para determinar su probable rendimiento. Mediante estos muestreos, se establece cuando la caña puede proveer un rendimiento satisfactorio, aceptable, regular o malo, para proceder al corte de la caña, y, en futuras cosechas corregir lo malo que se haya presentado.

En Guatemala existen básicamente dos opciones para la molienda de caña, primero: que el ingenio posea sus propias plantaciones. Segundo: que el ingenio compre caña a fincas proveedoras cercanas. En departamentos que no son de la costa sur del país, dada la considerable distancia de las plantaciones con respecto a los ingenios, la caña se procesa en trapiches y se obtiene la panela o rapadura.

La caña es cortada y transportada al ingenio, pasado por alguna de las básculas donde se registran el peso a entregar, para luego depositarla en el patio y su posterior ingreso a la fábrica, donde la caña pasa por varios procesos para obtener de ella los productos deseados.

Un ingenio azucarero, en el medio guatemalteco posee personal operativo, administrativo, técnico, profesional y ejecutivo por la diversidad de actividades que dentro de él se desarrollan.

Además, requiere una fuerte inversión de capital que involucra a varios accionistas. Este capital está distribuido entre la planta industrial, el inventario de repuestos, el inventario; así como inversiones, créditos y cierta reserva de efectivo.

Dentro del proceso de la caña de azúcar, se habla de períodos de actividad o períodos de zafra los cuales podrán manejarse indistintamente para indicar el tiempo en cuantos días, semanas o meses el ingenio muele caña para la obtención de sus productos.

En Guatemala, la zafra se desarrolla dentro de un período de cuatro a seis meses, comenzando en algunos casos en noviembre y terminando en otros casos en mayo o bien en junio del año siguiente.

Las zafras, para términos de identificación entre fincas e ingenios reciben el nombre compuesto por el año en que se prepara la caña y el año en que se termina; es decir, si se está referenciando a la molienda del 2009 la zafra recibe el nombre de Zafra 08/09.

Un ingenio importa gran cantidad de repuestos para su funcionamiento en cada zafra, debido a que localmente se encuentran disponibles muy pocos de ellos a precios sensiblemente caros.

Resulta importante considerar que de la caña de azúcar se obtienen productos para comercio local, así como para la exportación. En Guatemala, de la caña se obtienen productos tales como azúcar blanca, azúcar crudo, melaza, bagacillo para funcionamiento de calderas, alcohol anhidro o alcohol carburante y de varias calidades; aceites para uso industrial, linaza, y todos ellos pueden tener un uso dentro de la industria nacional.

### **2.1.2. Funcionamiento y componentes de un ingenio azucarero**

El funcionamiento de un ingenio azucarero puede dividirse para su estudio en nueve etapas que abarcan cada uno de los procesos generales más importantes en la obtención del grano:

- Campo y batey
- Extracción del jugo
- Preparación del jugo
- Calentamiento y clarificación
- Estación de evaporadores
- Estación de tachos
- Centrifugado y secado
- Producción de vapor y energía eléctrica
- Análisis de laboratorio.

### **2.1.3. Campo y batey**

Existen muchas variedades de caña de azúcar en la actualidad no existiendo una sola plantación donde todo el cultivo sea de una sola especie. La razón de esto se debe a la resistencia a distintos tipos de plaga que cada tipo de caña tiene y que consiste uno de los principales factores de selección de variedades además del contenido de fibra y sacarosa. De esta forma, si una plaga arremete contra un cultivo, sólo una parte, la más propensa a daño, será la afectada.

La caña se siembra en un agujero poco profundo o en surcos en la parte superior de un camellón de una o varias hileras, siendo ésta, la práctica más común en plantaciones extensas. Luego se cubre por medio de un azadón o por una rastra de discos y se añaden herbicidas de preemergencia poco después de la siembra. El fertilizante no se aplica en la siembra, se añade poco después de que inicia el crecimiento.

El control de plagas se realiza mediante riego por aviones; el agregado de madurantes se efectúa a través de tanques especiales remolcados por tractores y aplicado directamente en la base del vástago. A medida que se acerca la época de cosecha, se retarda el crecimiento y aumenta el contenido de sacarosa limitando el nitrógeno y el agua.

El corte tiene un único objetivo: entregar al molino tallos de caña de azúcar de buena calidad. La calidad, medida por el contenido de sacarosa y de trash o basura, se reduce por los daños a los que se somete la caña, el aumento de la basura en la caña entregada y las demoras en dicha entrega.

La remoción de las puntas o cogollos resulta muy conveniente debido a que éstas, contienen poca sacarosa pero poseen un alto contenido de almidón y azúcares reductores. Dichas puntas disminuyen el rendimiento en la casa de cocimientos debido a que salen del tren de molinos con más sacarosa de la que originalmente poseen y agregan azúcares que reducen la sacarosa en las etapas subsiguientes.

Asimismo, las hojas de la caña contienen altos índices de sílice, lo que contribuye al desgaste de los rodillos de los molinos. La reducción del trash se logra más eficientemente a través del corte a mano. En la actualidad, la práctica más común de corte es la mecanizada.

El batey se localiza inmediatamente fuera de la fábrica. El proceso de recepción inicia por el ingreso del camión al batey para lavado en frío y pesaje.

Luego, haciendo uso de grúas, se descargan los vehículos y se introduce la caña mediante un cargador frontal al conductor que la lleva hacia la preparación de las fibras, donde además es lavada con agua caliente.

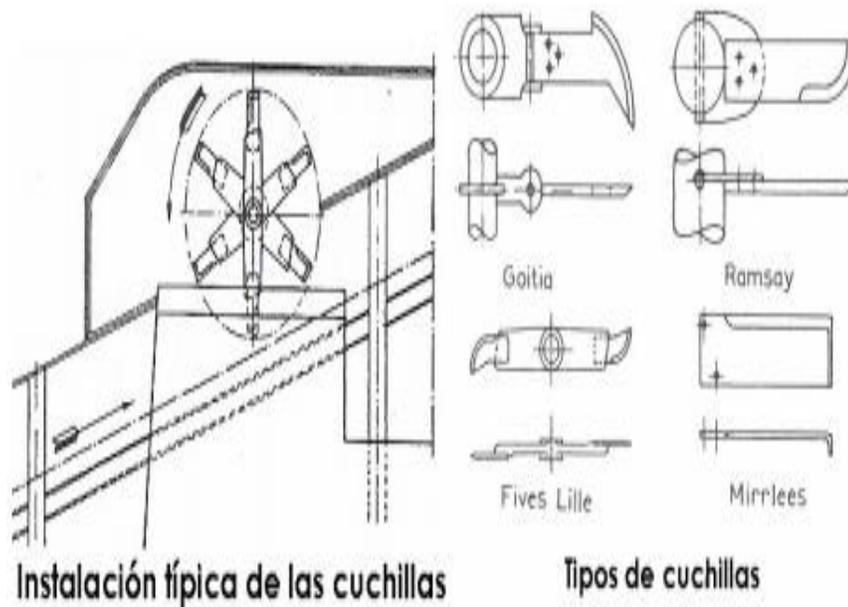
El lavado del camión reduce hasta en un 40 por ciento el trash de la carga y en un 60 por ciento la ceniza por quema. Otra de las ventajas del lavado es que ahorra hasta 10 libras de azúcar por tonelada de caña molida debido a la absorción de jugos que el trash y las cenizas hacen en el proceso de molienda.

#### **2.1.4. Extracción del jugo**

La preparación de fibras consiste en hacer pasar los bocados de caña a través de juegos de cuchillas giratorias (figura 1) que cumplen funciones de desfibrado y desmenuzado. Las cuchillas siempre dejan una cierta proporción

de caña sin cortar en el fondo del colchón y que sirve como medio sustentador de las cañas cortadas. A pesar de que la caña picada y desfibrada tiene una apariencia esponjosa, tiene una densidad 40 por ciento mayor que la de la caña suelta y entera, debido a la ausencia de espacios vacíos. De aquí es transportada la fibra hacia el tandem de molinos para la extracción del jugo.

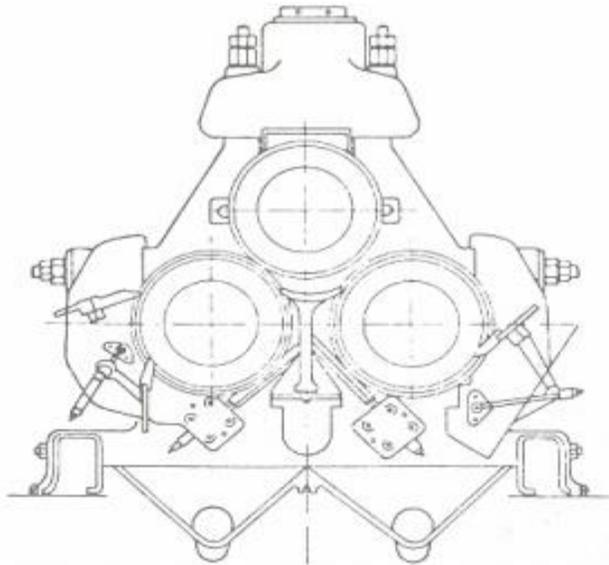
Figura 1. **Instalación típica de cuchillas y tipos de cuchillas**



Fuente: E. HUGOT. *Manual para ingenieros azucareros*. p. 42

La extracción del jugo moliendo la caña entre pesados rodillos o mazas, constituye la siguiente etapa del proceso. El molino o trapiche consta de unidades múltiples que utilizan combinaciones de tres rodillos (figura 2), a través de los cuales pasa la caña exprimida o bagazo.

Figura 2. **Construcción típica de un molino**



Fuente: CHEN, James C. P. *Manual del azúcar de caña*. p. 97.

Para ayudar a la extracción del jugo (guarapo) se aplican aspersiones de agua y guarapo diluído sobre la capa de bagazo según sale de cada unidad de molienda; lo anterior contribuye a extraer por lixiviación y maceración el azúcar. El proceso es conocido como imbibición.

En las moliendas eficientes, más del 95 por ciento del azúcar contenido en la caña pasa al guarapo; este porcentaje se conoce como la extracción de sacarosa (pol de la extracción), o más sencillamente, la extracción. El bagazo final (megass) que sale del último molino contiene el azúcar no extraído, fibra leñosa y de un 45 a un 55 por ciento de agua. Este material pasa por lo general a las calderas como combustible.

### 2.1.5. Preparación del jugo

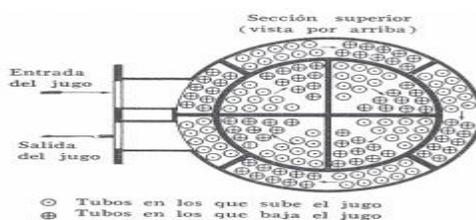
El guarapo color verde oscuro procedente del trapiche es ácido y turbio, por lo que deberá ser preparado para su clarificación, lográndose esto mediante la sulfitación y el alcalizado. La sulfitación constituye el quemar azufre en un horno y hacer pasar el gas obtenido en contracorriente con el guarapo. Este, ayuda a dar al azúcar su color blanco final. La lechada de cal, neutraliza la acidez natural del guarapo, formando sales insolubles de calcio, en su mayor parte fosfato de calcio.

### 2.1.6. Calentamiento y clarificación

El guarapo preparado mediante sulfitado y alcalizado es calentado hasta el punto de ebullición o ligeramente arriba en unos intercambiadores de calor formados por una calandria tubular de múltiples pasos.

Este calentamiento permite que durante la clarificación del jugo se coagulen la albúmina y algunas grasas, ceras y gomas en presencia de un agente floculante. Un esquema de un calentador de guarapo típico se muestra en la figura 3.

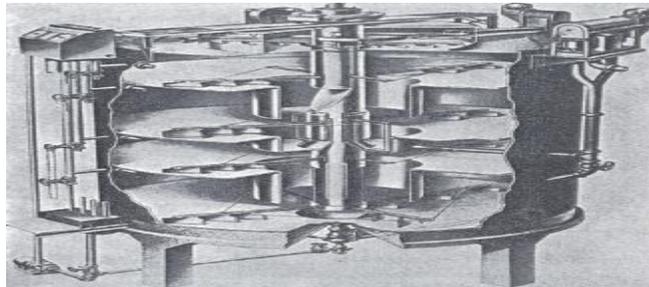
Figura 3. Sección de un calentador típico de guarapo



Fuente: E. HUGOT. *Manual para ingenieros azucareros*. p. 314.

El proceso de clarificación (o defecación) diseñado para remover las impurezas tanto solubles como insolubles, emplea en forma universal cal y calor como agentes clarificantes. Dentro del clarificador (figura 4) se forma un precipitado el cual atrapa los sólidos en suspensión al igual que las partículas más finas.

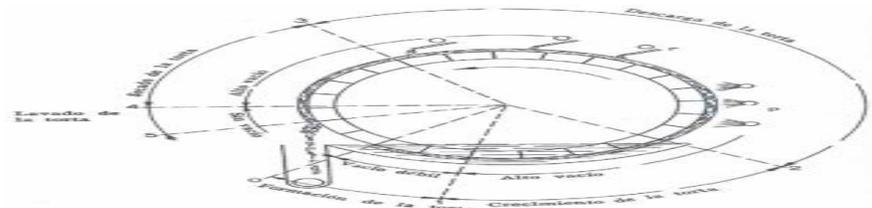
Figura 4. **Clarificador tipo Dorr – Oliver 444 Rapidorr**



Fuente: E. HUGOT. *Manual para ingenieros azucareros*. p. 304.

Los lodos se separan del jugo clarificado por sedimentación y se filtran en tambores rotativos de filtración (figura 5). El jugo filtrado regresa al proceso o pasa directamente al jugo clarificado y la torta de la prensa (cachaza) se regresa a los campos como fertilizante.

Figura 5. **Esquema de funcionamiento de un filtro rotativo al vacío**



Fuente: CHEN, James C. P. *Manual del azúcar de caña*. p. 97.

El jugo clarificado transparente y de un color parduzco pasa a los evaporadores sin tratamiento adicional.

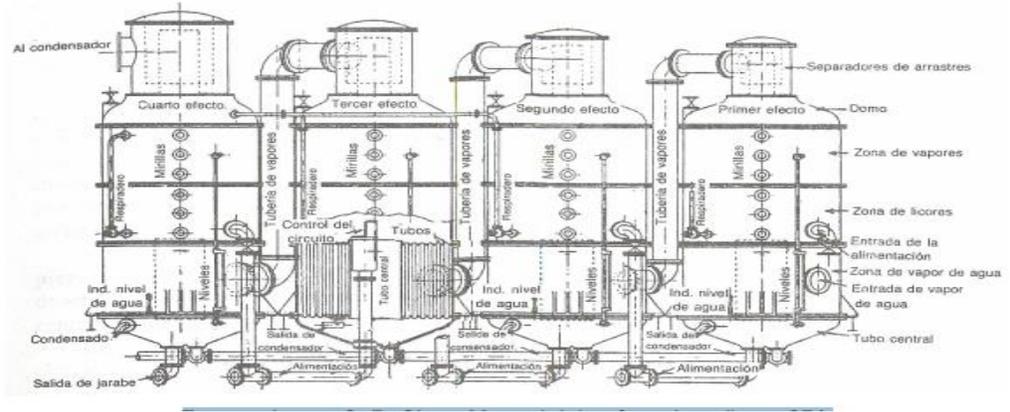
### **2.1.7. Estación de evaporadores**

El jugo clarificado, que tiene más o menos la misma composición que el jugo crudo extraído excepto las impurezas precipitadas por el tratamiento con azufre y cal, contiene aproximadamente 85 por ciento de agua. Dos terceras partes de esta agua se evaporan en evaporadores al vacío de múltiple efecto, los cuales consisten en una sucesión (generalmente cuatro) de celdas de ebullición al vacío, o cuerpos dispuestos en serie de manera que cada cuerpo subsiguiente tiene un grado más alto de vacío y, por consiguiente, hierve a una temperatura más baja. Los vapores de un cuerpo hacen hervir de esta manera el jugo contenido en el siguiente cuerpo.

El primer cuerpo utiliza vapor de escape de las turbinas y los siguientes cuerpos el vapor extraído del jugo bullido en el anterior. Mediante este sistema, el vapor introducido en el primer cuerpo, efectúa una evaporación de múltiple efecto. El vapor del cuerpo final pasa a un condensador.

El jarabe (meladura) sale en forma continua del último cuerpo con aproximadamente 65 por ciento de sólidos y 35 por ciento de agua. La figura 6 muestra una instalación típica de cuádruple efecto.

Figura 6. **Evaporador normal de cuádruple efecto**

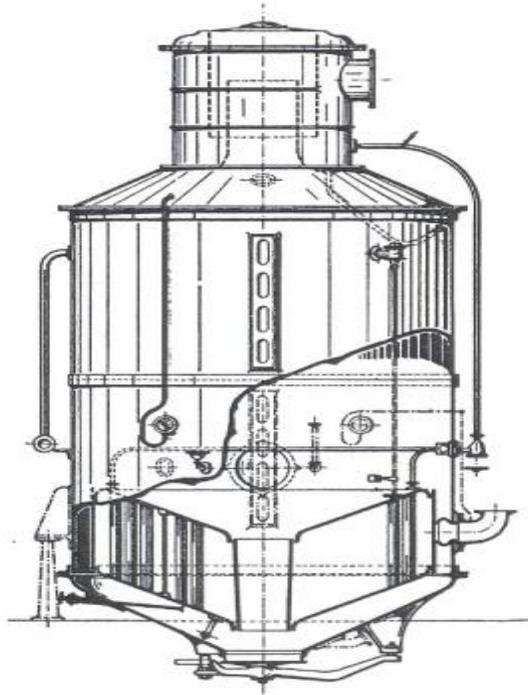


Fuente: CHEN, James C. P. *Manual del azúcar de caña*. p. 251.

### 2.1.8. Estación de tachos

La cristalización tiene lugar en tachos al vacío de simple efecto (figura 7), donde el jarabe se evapora hasta quedar saturado de azúcar. En este momento se añaden semillas (azúcar glass al inicio de una zafra, magma durante la zafra) a fin de que sirvan de núcleos para los cristales de azúcar, y se va añadiendo más jarabe según se evapora el agua. El crecimiento de los cristales continúa hasta que se llena el tacho.

Figura 7. **Tacho al vacío**



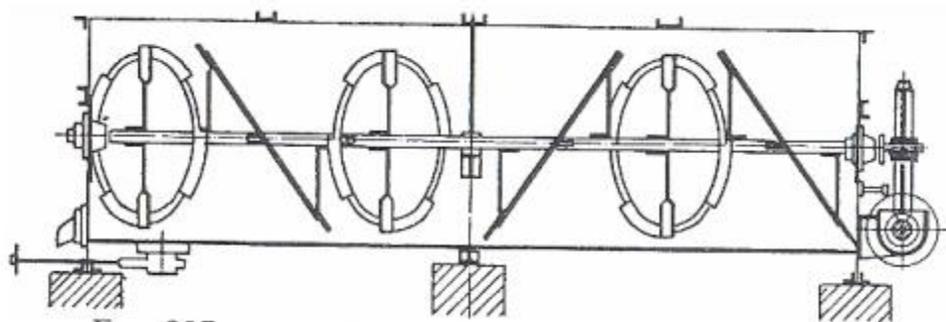
Fuente: HUGOT. *Manual para ingenieros azucareros*. p. 441.

Bajo la vigilancia de un tachero experto (o con instrumentos adecuados) 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, y los cristales y el jarabe forman una masa densa conocida como masa cocida.

La templa (el contenido del tacho) se descarga luego por medio de una válvula de pie a un mezclador o cristalizador. En el sistema de tres cristalizaciones, se produce una masa denominada masa C, o tercera, la cual al ser centrifugada proporcionará magma de tercera (semilla para hacer segundas) y melaza. El magma de tercera sirve como pie de templa para hacer

una masa B, o segunda, y su centrifugado extrae magma de segunda (para hacer primeras) y miel de segunda. El magma de segunda, sirve para hacer templas de primera o A, y la centrifugada de ésta, produce azúcar comercial y miel primera. La figura 8 muestra el esquema de un cristalizador.

Figura 8. **Esquema de un cristalizador**



Fuente: HUGOT. *Manual para ingenieros azucareros*. p. 496.

Para hacer terceras se puede cristalizar directamente la meladura y las mieles de segunda. Para hacer segundas se utiliza meladura y mieles de primera. Para hacer primeras se utiliza meladura.

Las mieles o melazas finales o residuales, un material denso y viscoso que contiene aproximadamente una tercera parte de sacarosa, una quinta parte de azúcares reductores y el resto de ceniza, compuestos orgánicos no azúcares y agua, sirve como base para la alimentación del ganado, fabricación de alcohol industrial, producción de levadura y para otros usos diversos.

### **2.1.9. Centrifugado y secado**

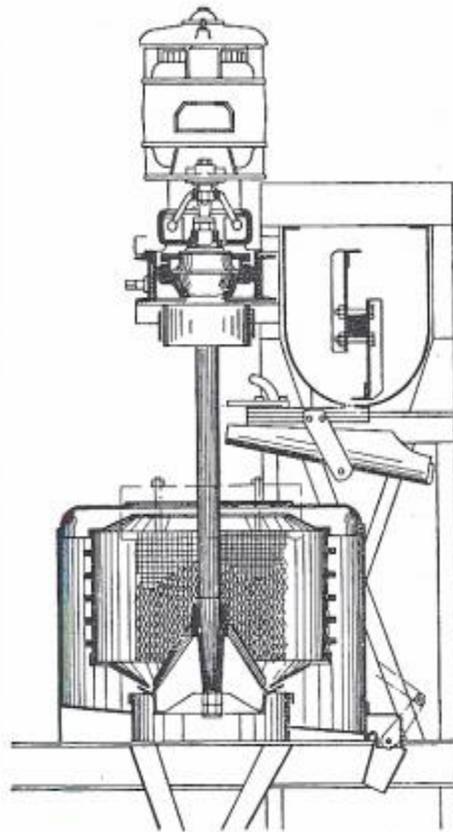
La masa cocida proveniente del mezclador o del cristalizador se lleva a máquinas giratorias llamadas centrífugas. El tambor cilíndrico, suspendido de un eje, tiene paredes laterales perforadoras forradas en el interior con tela metálica; entre ésta y las paredes, hay láminas metálicas que contienen perforaciones. El tambor gira a velocidades que oscilan entre 1 000 y 1 800 rpm.

El revestimiento perforado, retiene los cristales de azúcar que pueden lavarse con agua si se desea producir azúcar blanca. La operación de las centrífugas es tanto en forma continua como en batch. Las masas C y B se trabajan en forma continúa y las templeas A, en batch.

Para liberar el jarabe de la superficie de los granos se utiliza agua en cantidades especificadas por el fabricante y para la limpieza de las telas puede utilizarse agua o vapor.

La figura 9 muestra un tipo común de centrífuga para producción en batch de azúcar blanca estándar.

Figura 9. **Corte transversal de una centrífuga**



Fuente: HUGOT. *Manual para ingenieros azucareros*. p. 509.

El licor madre, la miel, pasa a través del revestimiento debido a la fuerza centrífuga ejercida (de 500 hasta 1 800 veces la fuerza de la gravedad), y después de que el azúcar es purgado se corta (descarga), dejando la centrífuga lista para recibir otra carga de masa cocida. Aquí se agrega el vitaminado a la carga según los requerimientos remanufactura de azúcar de venta local.

El azúcar descargado de las centrífugas se pasa a un secador de tambor giratorio horizontal el cual seca el grano con aire calentado por vapor. La parte superior del secador calienta, mientras que la inferior enfría, ya que si el grano

se pasa al envase caliente, atrapa más humedad. Generalmente se instala una secadora en caliente seguida de una secadora en frío.

El empaque dependerá del uso, pero se utiliza saco de polímero cosido para venta al mayor y bolsas plásticas para venta al menudeo. En la bodega se deberá controlar que la humedad no aumente y que los sacos se encuentren dentro del rango de estiba máxima, así como un control riguroso contra incendios.

#### **2.1.10. Producción de vapor y energía eléctrica**

El bagazo producido sirve como combustible en la producción de vapor en las calderas del ingenio, el cual constituye el medio de generación de potencia mecánica que mueve, inclusive, los mismos molinos que lo producen, siendo así un proceso de tipo regenerativo o con retroalimentación. Se acostumbra en el medio, aparte de generar el vapor que utiliza la fábrica, generar vapor para producir energía eléctrica y, si existe un excedente considerable, venderlo en el mercado eléctrico nacional.

El bagazo o megazo es el subproducto o residuo de la molienda de la caña. Constituye la fibra leñosa de la caña en el que permanecen el jugo residual y la humedad provenientes del proceso de extracción. Al decir fibra se hace referencia a todos los sólidos insolubles, fibrosos o no. En la práctica, aproximadamente la mitad es fibra y la mitad es jugo residual, altamente compuesto por agua, con variaciones que resultan de los procedimientos de molienda y de la variedad y calidad de caña.

El valor calorífico del bagazo seco muestra una sorprendente uniformidad en todo el mundo. Los valores del mismo se encuentran entre 8200 y 8400 Btu por libra. El bagazo contiene una gran cantidad de humedad que varía según la velocidad y eficiencia de la molienda.

El valor calorífico real del bagazo quemado depende de la humedad presente, la que tiene que ser evaporada mediante unidades de calor. Otras variables son la temperatura de la chimenea y el exceso de aire.

La fibra de bagazo posee carbono (47 por ciento), hidrógeno (6,5 por ciento), oxígeno (44 por ciento), ceniza y materiales indeterminados (2,5 por ciento). El precio del bagazo se obtiene con base a su capacidad calorífica más que a su costo de producción. La capacidad de las calderas varía según el equipo de fábrica, la calidad de la caña, la cantidad de agua de imbibición que se agrega y la cantidad de azúcar que se produce.

La cogeneración en una fábrica azucarera se realiza de dos formas: mediante el uso de vapor a través de una turbina generalmente del tipo de contrapresión y mediante el uso de bunker o diésel en plantas generadoras con motores de combustión interna. Tanto para las turbinas de vapor de los molinos como de los generadores eléctricos, el escape proporciona el flujo de vapor necesario para el resto del proceso de la planta.

## **2.2. Evaporador**

Son equipos vaporizantes que utilizan como fuente de energía un vapor latente a una temperatura mayor a la temperatura de vaporización del agua, o solución acuosa para concentrar.

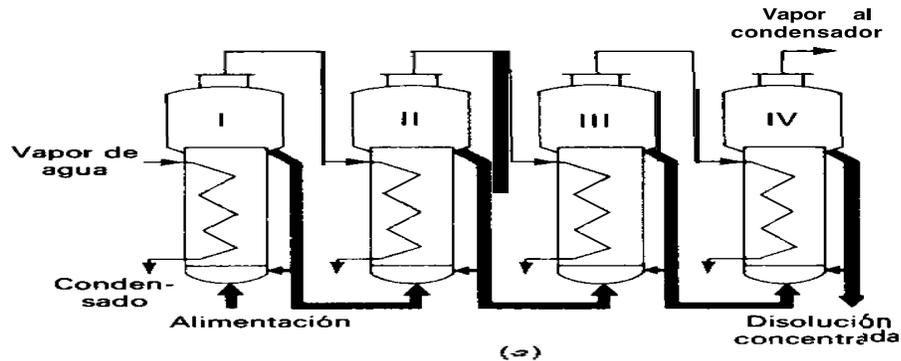
### **2.2.1. Evaporación química**

En la industria química, la manufactura de agentes químicos tales como la sosa cáustica, sal de mesa y azúcar; empieza con soluciones acuosas diluidas de las que deben eliminarse grandes cantidades de agua antes de poder llegar a la cristalización en equipo adecuado para este fin. En los evaporadores químicos es el producto lo que se retira del fondo de estos.

### **2.2.2. Ausencia de purgas**

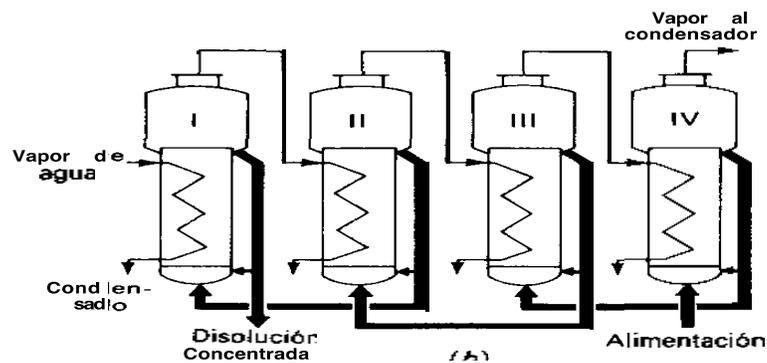
Los evaporadores químicos no operan con el sistema de purgas y en lugar de que el líquido se alimente en paralelo a cada evaporador, usualmente se alimenta a sistemas de múltiple efecto en serie. Los métodos comunes de alimentarlos se muestran en la figuras 10 y 11. El alimento al primer efecto es parcialmente evaporado en él y parcialmente en el resto de los efectos.

Figura 10. **Evaporador químico de cuádruple efecto arreglado para flujo paralelo y flujo contra corriente, alimentación en paralelo**



Fuente: MCCABE, Warren L. *Operaciones unitarias en ingeniería química*. p 506.

Figura 11. **Alimentación en contracorriente**



Fuente: MCCABE, Warren L. *Operaciones unitarias en ingeniería química*. p 506.

Cuando el alimento líquido fluye en la misma dirección que el vapor, se llama alimentación en paralelo, y cuando el alimento lo hace en dirección contraria se llama alimentación en contracorriente. Desde el punto de vista del uso efectivo de los potenciales de temperatura, la alimentación en paralelo es preferible. Si los líquidos son muy viscosos, hay una ventaja al usar la

alimentación en contracorriente, ya que la temperatura del primer efecto es siempre la mayor y la correspondiente viscosidad será menor.

Los evaporadores químicos se clasifican en dos grupos: de circulación natural y de circulación forzada. Los evaporadores de circulación natural se usan unitariamente en efecto múltiples para los requerimientos más simples de evaporación. Los evaporadores de circulación forzada se usan para líquidos viscosos, para los que forman sales, y las soluciones que tienden a incrustarse. Los evaporadores de circulación natural se clasifican en cuatro clases principales:

- Tubos horizontales
- Calandria con tubos verticales
- Tubos verticales con canasta
- Tubos verticales largos

En este documento se trata únicamente con aquéllos que están diseñados en la base de los coeficientes totales comúnmente aceptados.

### **2.2.3. Evaporadores de tubos horizontales**

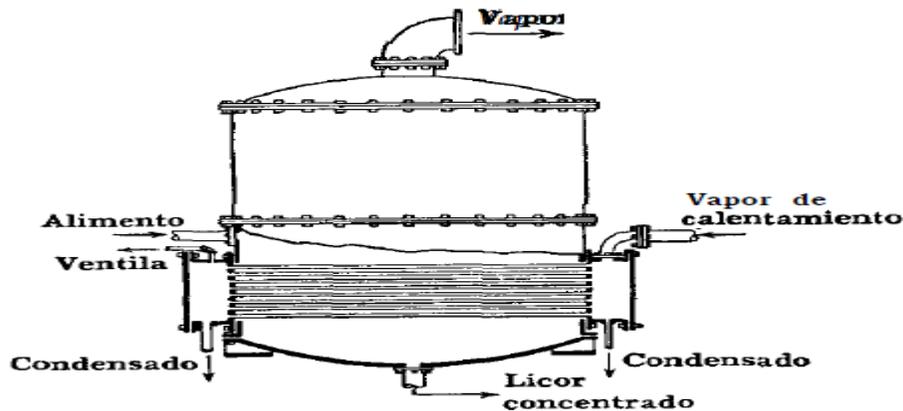
Los evaporadores de tubos horizontales se muestran en la figura 12 y son los tipos más antiguos de evaporadores químicos. Aún cuando en cierto tiempo tuvieron una aceptación muy amplia, están dejando lugar a otros tipos. Consisten en un cuerpo cilíndrico o rectangular y de un haz de tubos que usualmente es de sección cuadrada. Este tipo de evaporadores no aprovechan bien las corrientes térmicas inducidas por el calentamiento, y por lo mismo, no son tan aceptables con tipos que los han reemplazado.

El evaporador horizontal es el único tipo de evaporador que emplea vapor dentro de los tubos. La principal ventaja de los evaporadores horizontales es el reducido espacio requerido para su instalación en la dimensión vertical y el arreglo del haz de tubos, de manera que el aire puede purgarse con el vapor no permitiendo que bloquee superficie de calentamiento.

El evaporador horizontal es menos satisfactorio para líquidos que formen incrustaciones o que depositen sales; los depósitos se forman en el exterior de los tubos, y son, por lo tanto, usados únicamente para problemas de concentración relativamente simples, en lugar de la preparación de un líquido para una cristalización posterior. Están indicados para procesos en los que el producto final es un líquido en lugar de un sólido, tal como jarabes de azúcares industriales, donde el gran volumen de líquido almacenado en el evaporador puede permitir un ajuste preciso de la densidad final cambiando la cantidad retenida en el evaporador.

La longitud de los tubos está determinada por el tamaño del evaporador, debido a que la evaporación tiene lugar fuera de los tubos, eliminándose el problema de incrustación dentro de los mismos. El evaporador de tubo horizontal usa diámetros de tubos menores que cualquier otro, de  $3/4$  a  $1 1/4$  de pulgada de diámetro.

Figura 12. **Evaporador de tubos horizontales**



Fuente: Q. KERN, Donald. *Procesos de transferencia de calor*. p. 466.

#### 2.2.4. **Evaporadores de calandria**

El evaporador de calandria se muestra en la figura 13, consiste en un haz de tubos verticales, cortos, usualmente de no más de 6 pies de altura, colocado, entre dos espejos que se remachan en las bridas del cuerpo del evaporador. El vapor fluye por fuera de los tubos en la calandria, y hay un gran paso circular de derrame en el centro del haz de tubos donde el líquido más frío recircula hacia la parte inferior de los tubos. El área de este derrame varía desde la mitad del área de los tubos hasta un área igual a ella. Los tubos son grandes, hasta de 3 pulgadas diámetro, para reducir la caída de presión y permitir una rápida circulación, y se instalan en espejos encasquillados.

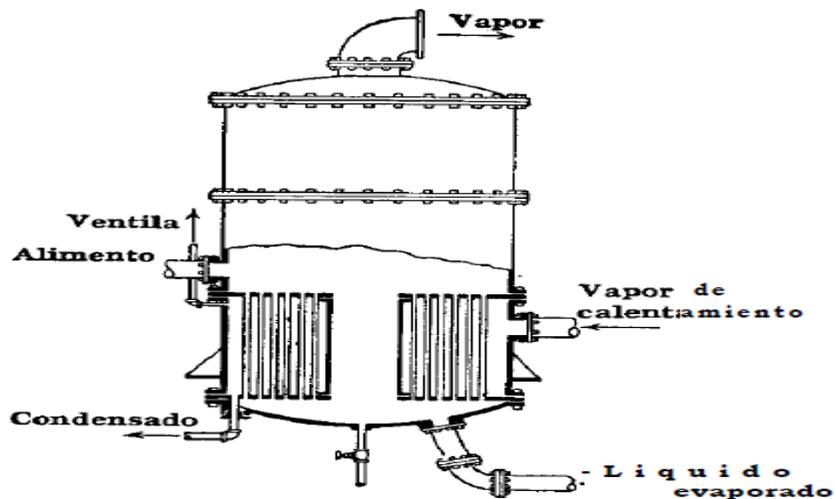
La distribución de una calandria típica se muestra en la figura 14. Unos de los problemas es colocar deflectores en el espacio vapor, de manera que haya una distribución relativamente completa del vapor en los tubos. Otro problema, es el de proveer de puntos de purga adecuados para que no se formen bolsas de gases no condensables. El condensado se remueve en cualquier punto

conveniente. El espacio sobre el nivel del líquido en la calandria, sirve primariamente para liberar el líquido que es arrastrado por el vapor.

Un accesorio común a todos los evaporadores es una trampa que está instalada en la línea de vapor con el propósito de remover el líquido arrastrado y de volverlo al cuerpo del líquido. En las figura. 14<sup>a</sup> y 14<sup>b</sup> se muestran dos de estas trampas que son típicas. Su principio de operación es la eliminación centrífuga de las gotitas de líquido.

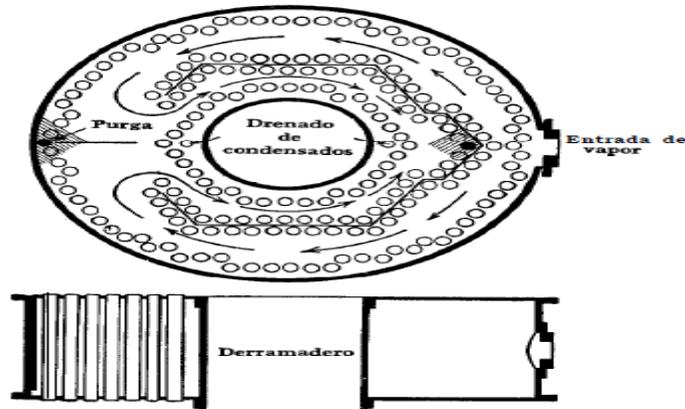
Los evaporadores de calandria son tan comunes que a menudo se les llama evaporadores estándar. Puesto que la incrustación ocurre dentro de los tubos, es posible usar el evaporador estándar para servicios más rigurosos que el evaporador de tubos horizontales, y además, puede instalarse un agitador en el fondo cónico o abombado para aumentar la circulación.

Figura 13. **Evaporador de calandria**



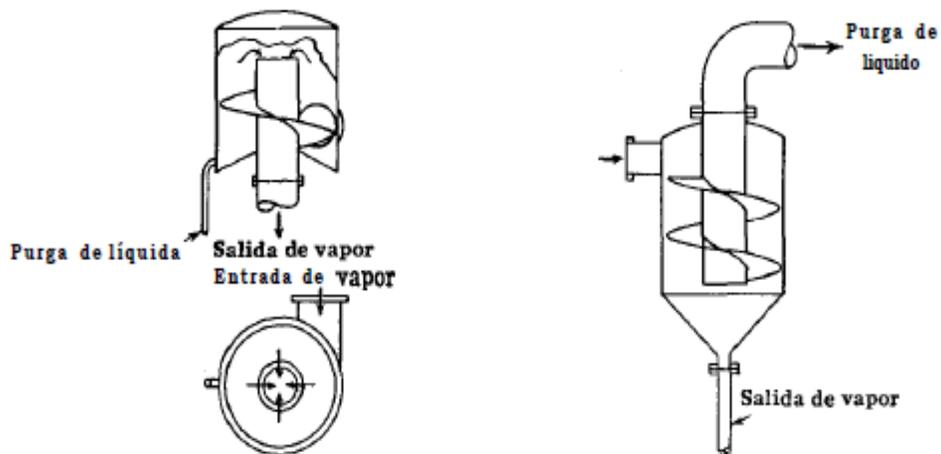
Fuente: Q. KERN, Donald. *Procesos de transferencia de calor*. p. 467.

Figura 14. Colocación típica de los deflectores en una calandria. Las flechas indican la dirección del flujo. Las áreas sombreadas indican la colocación de las purgas de no-condensables



Fuente: Q. KERN, Donald. *Procesos de transferencia de calor*. p. 467.

Figura 15. Trampa con salida inferior y trampa con salida superior



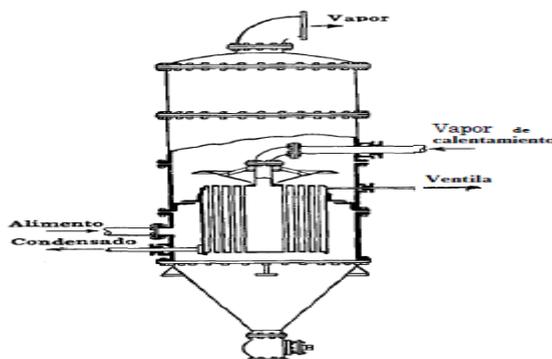
Fuente: Q. KERN, Donald. *Procesos de transferencia de calor*. p. 469.

### 2.2.5. Evaporadores de canasta

Un evaporador de canasta se muestra en la figura 16 es similar al evaporador de calandria, excepto en que tiene el haz de tubos desmontables, lo que permite una limpieza rápida. El haz de tubos se soporta sobre ménsulas interiores, y el derramadero está situado entre el haz de tubos y el cuerpo del evaporador, en lugar de la parte central. Debido a que los espejos están soportados libremente, el problema de la expansión diferencial entre los tubos y el cuerpo vapor no es importante. Este tipo frecuentemente se diseña con fondo cónico y se le puede instalar un agitador para aumentar la circulación.

Como resultado de estas ventajas mecánicas, el evaporador de canasta puede usarse para licores con tendencia a incrustar, aun cuando se recomienda para líquidos con altas viscosidades o muy incrustantes. La selección de evaporadores de canasta o de calandria, sigue usualmente la política establecida de diferentes industrias, en las que son usados después de muchos años de experiencia con modificaciones sugeridas por los fabricantes. Algunos fabricantes tienen preferencia por un tipo para cierta aplicación, mientras que otro preferirá el segundo tipo para el mismo servicio.

Figura 16. Evaporador de canasta



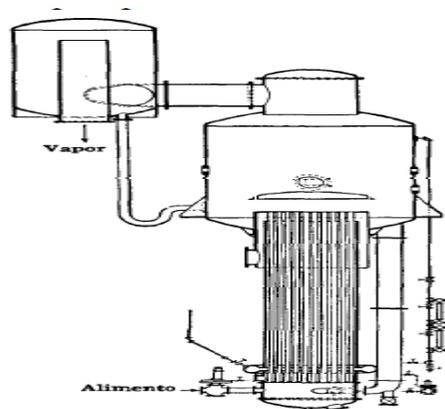
Fuente: Q. KERN, Donald. *Procesos de transferencia de calor*. p. 470.

### 2.2.6. Evaporadores de tubos verticales largos

Un evaporador de tubos verticales largos, se muestra en la figura 17 está formado por un elemento calefactor tubular diseñado para el paso de los licores a través de los tubos sólo una vez, movidos por circulación natural. El vapor entra a través del cinturón y el haz de tubos tiene deflectores a manera de lograr un movimiento libre del vapor, condensado y no condensado hacia abajo. El espejo superior de los tubos está libre, y justamente sobre él, hay un deflector de vapor para reducir el arrastre. Este tipo de evaporador no es especialmente adaptable a los licores incrustantes o que depositan sales, pero es excelente para el manejo de líquidos espumosos o que forman natas.

La velocidad del vapor que sale de los tubos es mayor que en los tipos de tubos verticales cortos. Cuando se dispone para recirculación, el aparato es como se muestra en la figura 18 los tubos son usualmente de una pulgada a dos pulgadas de diámetro externo, y de doce a catorce pies de longitud. En este tipo la liberación de los vapores ocurre fuera del cuerpo del evaporador.

Figura 17. **Evaporador de tubos verticales largos**



Fuente: Q. KERN, Donald. *Procesos de transferencia de calor*. p. 470.

### **2.2.7. Evaporadores de circulación forzada**

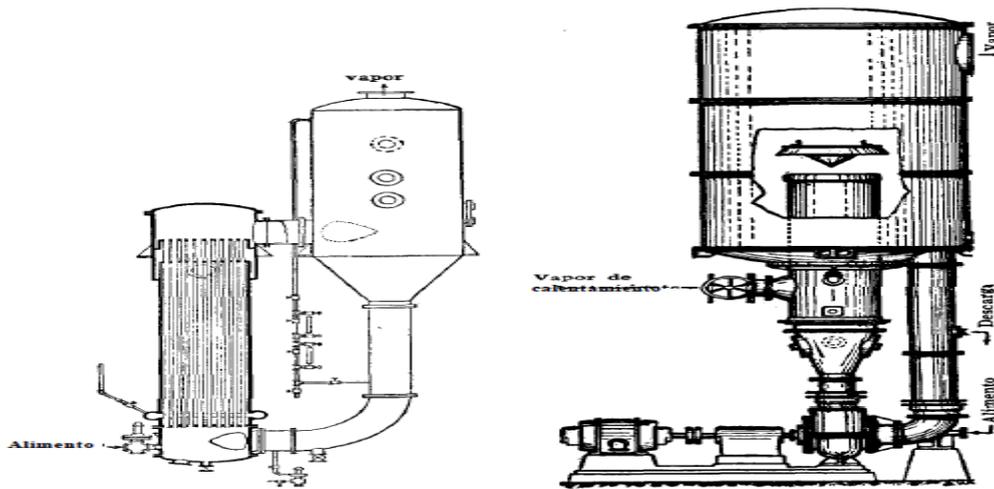
Los evaporadores de circulación forzada se fabrican en gran variedad de arreglos, como se indica en las figuras 18 a 20. Los evaporadores de circulación forzada pueden no ser tan económicos en operación como los evaporadores de circulación natural, pero son necesarios cuando los problemas de concentración involucran soluciones de flujo pobre, incrustantes, y ciertas características térmicas. Puesto que el grupo de Grashof varía inversamente con el cuadrado de la viscosidad, hay un límite de viscosidades de soluciones que recirculan naturalmente.

Con materiales muy viscosos no hay otra alternativa, sino, la de usar este tipo de evaporador. También, donde hay una tendencia a la formación de incrustaciones o al depósito de sales, las altas velocidades que se obtienen por el uso de las bombas de recirculación, son los únicos medios de prevenir la formación de depósitos excesivos. Los evaporadores de circulación forzada están bien adaptados para un control preciso del flujo, particularmente cuando un tiempo de contacto excesivo puede ser perjudicial a la solución química. Los tubos para los evaporadores de circulación forzada, son más pequeños que en los tipos de circulación natural, y generalmente no exceden a las 2 pulgas de diámetro externo.

En la figura 18, el vapor de calentamiento entra al haz de tubos por la parte exterior del cuerpo del evaporador, y tiene contacto con los tubos en la parte superior del haz en el espacio anular provisto para este fin. En la parte superior del espejo se coloca un deflector, y, la bomba de recirculación se instala al nivel del piso. En la figura 19, se logra el mismo efecto mediante un haz de tubos externo, lo que simplifica la construcción pero que no lo hace tan

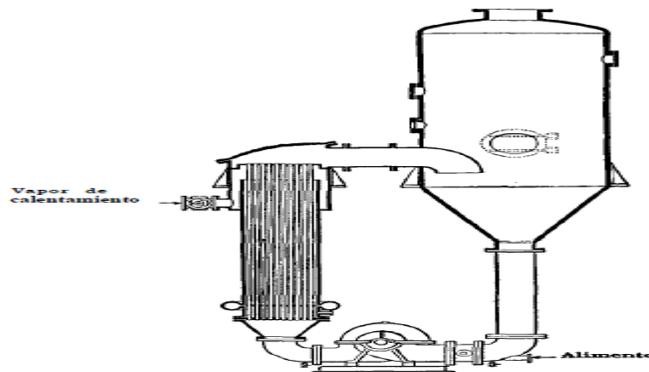
compacto. La figura 20, es una variación de este modelo con sistema calefactor horizontal que se aplica particularmente en alturas reducidas.

Figura 18. **Evaporador de tubos largos con recirculador y evaporador de circulación forzada con elemento calefactor vertical**



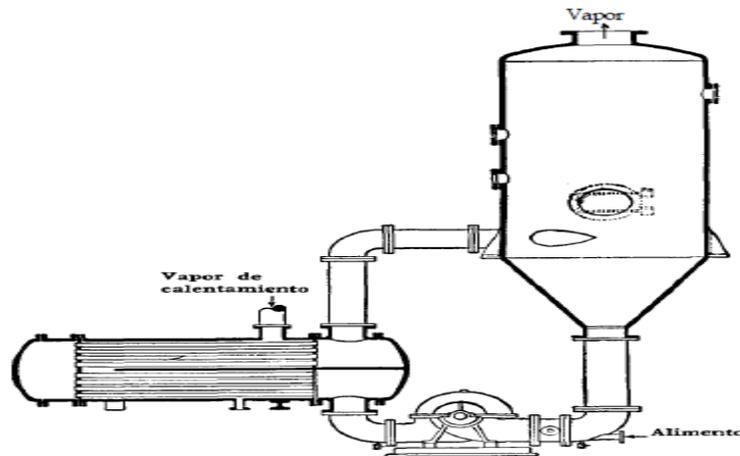
Fuente: Q. KERN, Donald. *Procesos de transferencia de calor*. p. 471.

Figura 19. **Evaporador de circulación forzada con elemento calefactor interno**



Fuente: Q. KERN, Donald. *Procesos de transferencia de calor*. p. 471.

Figura 20. **Evaporador de circulación forzada con elemento calefactor externo horizontal**



Fuente: Q. KERN, Donald. *Procesos de transferencia de calor*. p. 473.

### **2.3. Incrustación en evaporadores**

La incrustación trata de un conjunto de depósitos que se adhieren en los orificios de las cañerías, revestidores, tuberías de producción, válvulas, bombas, entre otros; de manera tal, que obstruyen el hueco e impiden el flujo normal de los flúidos y dificultan la transferencia de calor.

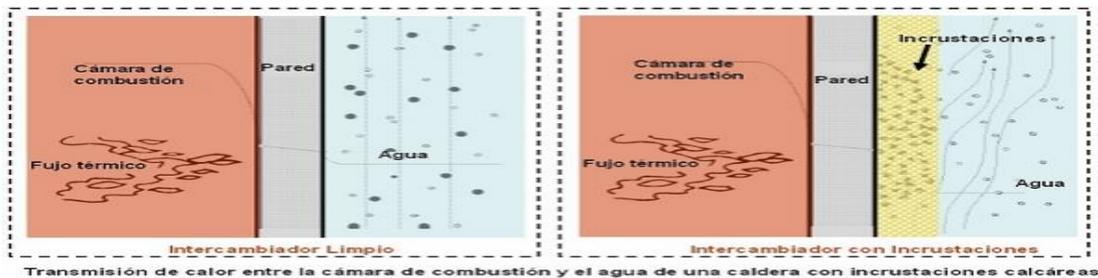
#### **2.3.1. Factor de suciedad**

Con frecuencia resulta imposible predecir el coeficiente de transferencia de calor global de un intercambiador de calor al cabo de un cierto tiempo de funcionamiento, teniendo sólo en cuenta el análisis térmico; durante el funcionamiento con la mayoría de los líquidos y con algunos gases, se van produciendo gradualmente unas películas de suciedad sobre la superficie en la que se realiza la transferencia térmica, que pueden ser de películas biológicas, óxidos, incrustaciones calizas procedentes de la caldera, lodos, carbonilla.

El efecto que esta suciedad originada, se conoce con el nombre de incrustaciones, y provoca un aumento de la resistencia térmica del sistema. Normalmente el fabricante no puede predecir la naturaleza del depósito de suciedad o la velocidad de crecimiento de las incrustaciones, limitándose únicamente a garantizar la eficiencia de los intercambiadores limpios.

La resistencia térmica del depósito se puede determinar generalmente, a partir de ensayos reales o de la experiencia.

Figura 21. **Incrustaciones en tubos**



Fuente: lemasa.com.br. Consulta: noviembre de 2012.

## 2.4. Limpieza hidrocínética de evaporadores

La limpieza hidrocínética es la utilización de la fuerza del agua presurizada para quebrar o quitar materiales indeseados que se agregan en superficies planas o curvas, impidiendo el buen funcionamiento de instalaciones industriales.

Siendo eficiente, por no utilizar productos químicos, es una herramienta ambientalmente correcta y segura en sus diversas aplicaciones.

### **2.4.1. Aplicaciones de sistemas con hidrocinética**

La técnica de limpieza hidrocinética es utilizada en varias áreas de la industria, ya que ésta es una forma rápida, confiable y barata de retirar suciedad de muchos tipos de superficie. Unos ejemplos de las industrias donde se utiliza este equipo son:

- Ingenios azucareros
- Aluminio
- Jugos de naranja y otros
- Automovilística
- Aviación
- Químicas y petroquímicas
- Industria cementera
- Celulosas
- Exploración y refinación de petróleo

### **2.4.2. Funcionamiento del equipo**

Para generar la presión de agua a punto de remover los materiales indeseados es necesaria una unidad de alta presión; esa unidad es compuesta de:

- Motor de accionamiento que puede ser eléctrico o diesel.
- Bomba de alta presión que comprime agua hasta la presión deseada.
- Componentes del sistema moto-bomba: tanques, filtros, bomba booster, tablero PLC.

Figura 22. **Unidad de alta presión**



Fuente: simcagroup. Consulta: noviembre de 2012.

### **2.4.3. Bomba de alta presión**

En la hidrocínética, el elemento más importante es la bomba de alta presión que es accionada por motor eléctrico o diesel.

Normalmente es una bomba de pistón tipo Triplex (con 03 pistones alternativos), y es básicamente dividida en dos partes:

- El cuerpo mecánico
- El cuerpo hidráulico

### **2.4.4. Cuerpo mecánico**

Es la parte que transforma el movimiento rotativo del motor, en movimiento alternativo, a través de un cigüeñal conectado a un pistón para la presurización del agua.

Ese cuerpo es constituido de:

- Carter
- Cigüeñal
- Eje de entrada
- Bielas y metales de bielas
- Cruzetas
- Bomba de lubricación forzada de aceite
- Filtro de aceite
- Intercambiador de calor del aceite
- Entre otros

#### **2.4.5. Cuerpo hidráulico**

El cuerpo hidráulico, también llamado cabezal, consiste en la parte del equipo donde el agua que va a ser utilizada; es llevada para que ésta, llegue a la presión requerida para poder romper las incrustaciones en la tubería.

Hacen parte del cuerpo hidráulico:

- Bloque cabezal
- Pistones de presión
- Camisas y empaquetaduras
- Válvulas y sus asientos
- Regulador de presión neumático
- Disco de ruptura
- Manómetro

#### **2.4.6. Tablero de control y PLC**

El tablero de control fue especialmente desarrollado para la protección del equipo en cuanto a problemas de mantenimiento, y también a la protección personal del operador.

Dentro de todos los sensores que poseen el sistema, se informa abajo sus alarmas y en esos casos se quita la presión del sistema, para ese motor, escribe el problema en PLC y acciona la alarma sonora y visual.

- Indicador de presión digital.
- Dispositivo electrónico de desarme del equipo en caso de rompimiento de manguera.
- Dispositivo electrónico de desarme en caso de super-presión del sistema.
- Baja presión de aceite de lubricación.
- Baja presión de agua después del filtro.
- Alta temperatura de aceite de lubricación.
- Alta temperatura de agua.
- Emergencia accionada.
- También recibe el comando on / off del sistema a través de un comando de pie eléctrico.

#### **2.4.7. Accesorios para hidrocínética**

Los accesorios para la limpieza hidrocínética, son los elementos que realmente realizan la remoción de la incrustación agregada en la pared del tubo, dentro los cuales se tiene los siguientes:

- Manguera principal de alta presión
- Tubos de red fija

- Conexiones en general
- Divisor de flujo
- Mangueras de limpieza
- Lanza rígida
- Tubojet – dispositivo especial para limpieza de evaporadores
- Pico rotativo para limpieza

#### **2.4.7.1. Manguera principal**

Las mangueras principales de alta presión son de construcción reforzada, la parte interna normalmente es de nylon o goma y en general poseen 2 o 4 espirales de acero. El revestimiento externo es en goma (muy parecidas con mangueras hidráulicas de aceite). Tienen cierta flexibilidad y su utilización es conducir el agua presurizada de la bomba hasta el divisor de flujo.

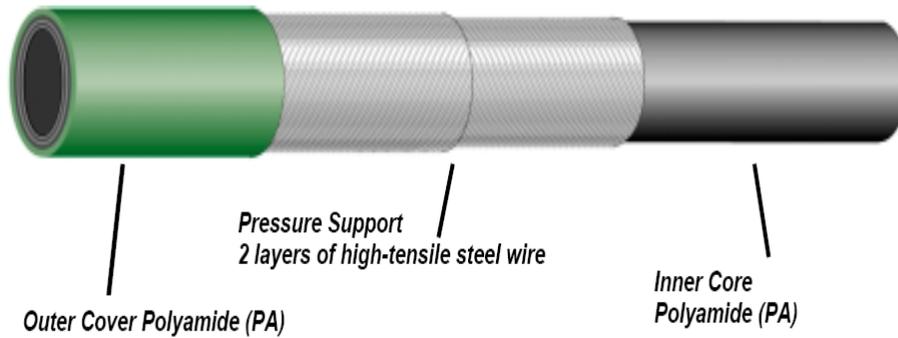
En la mayor parte de los casos, la bomba se queda en piso cero, mientras la limpieza es hecha en piso alto. Por eso esas mangueras son de larga longitud y su diámetro interno debe ser el mayor posible para que no tenga pérdida de presión en la propia manguera.

Se recomienda el uso de manguera de  $\text{Ø } \frac{1}{2}$ " para el caudal hasta 120 litros por minuto, y para caudales más altos el diámetro  $\frac{3}{4}$ ".

La presión máxima de ruptura, deberá ser al menos 2,5 veces la presión de trabajo, o sea, si la presión de trabajo es 1 000 BAR (15 000 PSI), su presión de ruptura deberá ser 2 500 BAR (36 000 PSI).

Por cuestión de seguridad, todas las mangueras deberán ser inspeccionadas constantemente.

Figura 23. **Mangueras para limpieza hidrocínética**



Fuente: simcagroup. Consulta: noviembre de 2012.

Figura 24. **Diagrama de uso del equipo**



Fuente: simcagroup. Consulta: noviembre de 2012.

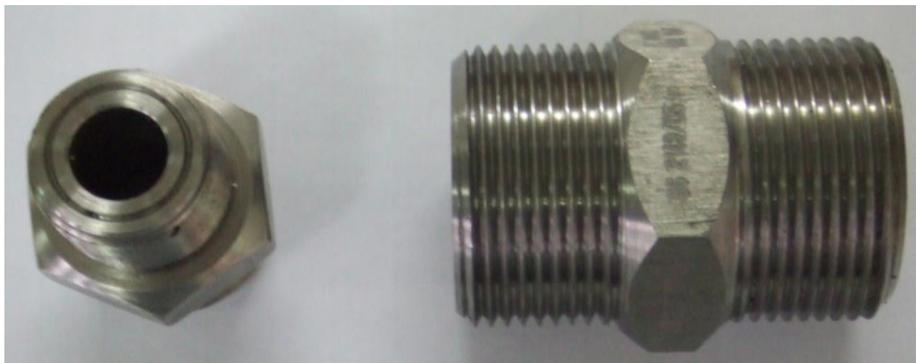


### **2.4.7.3. Conexiones para alta presión**

Las conexiones que se aplican para alta presión son estandarizadas y existen tanto en roscas tipo pulgada como en el sistema métrico.

Son de material resistente a la alta presión y en caso de fuga de agua, eso deberá ser sanado inmediatamente.

Figura 26. **Conexiones diversas**



Fuente: simcagroup. Consulta: noviembre de 2012.

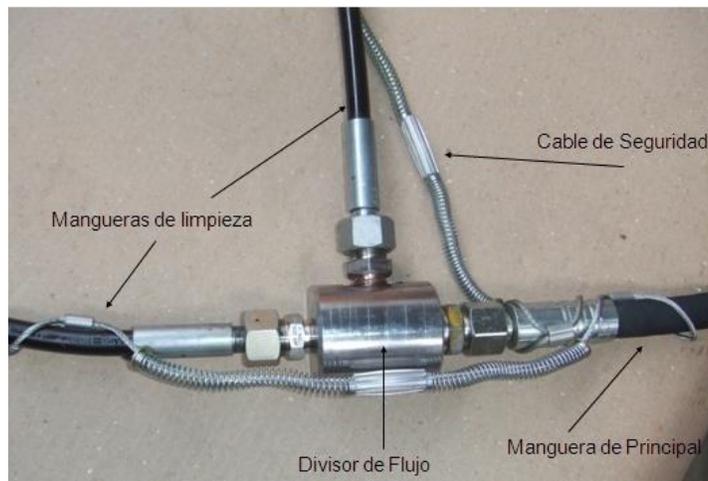
### **2.4.7.4. Divisor de flujo**

El divisor de flujo, es el aparato donde el agua que llega de la manguera principal se divide para las terminaciones que van ejecutar la limpieza dentro de los cuerpos.

Es una pieza en acero inoxidable y poseen una entrada y dos o tres salidas.

En caso el operador no necesite trabajar con todas las salidas, puede ser usado un plug para tapar esos divisores de flujo.

Figura 27. **Divisor de flujo**



Fuente: simcagroup. Consulta: noviembre de 2012.

#### **2.4.7.5. Mangueras de limpieza**

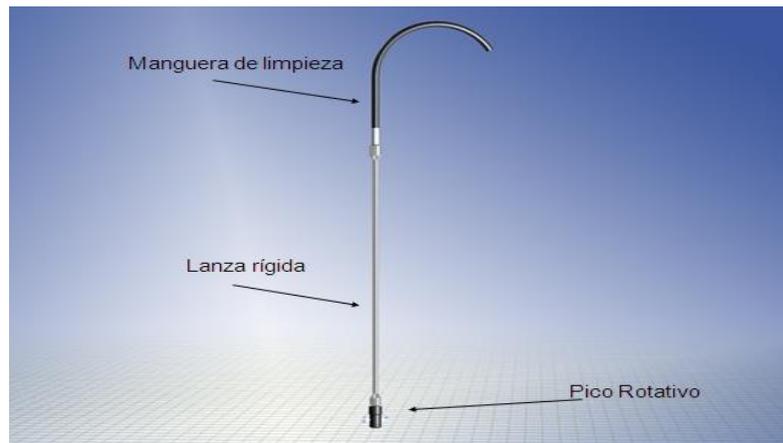
Las mangueras de limpieza son las que van ser utilizadas dentro de los vasos y así a dentro de los tubos.

Son fabricadas en Alemania y poseen interior en nylon, dos espirales de acero, y cobertura en poliuretano (más resistente a abrasión externa y liviana que las de goma).

Su diámetro interno es 8 milímetros, para evaporadores tipo Roberts, se recomienda el largo de 7,5 metros.

Presión máxima de trabajo 1 000 BAR (15 000 PSI) y ruptura 2 500 BAR (36 000 PSI). En todas las mangueras, los terminales son prensados y poseen certificación de teste.

Figura 28. **Lanza rígida**



Fuente: simcagroup. Consulta: noviembre de 2012.

#### **2.4.7.6. *Tubojet***

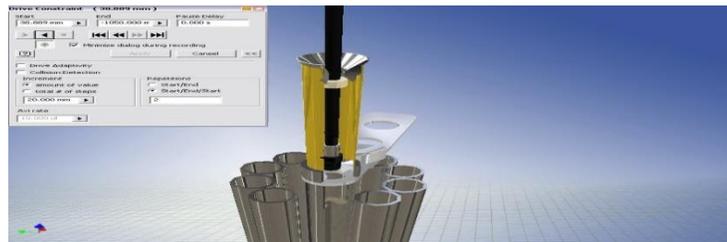
*Tubojet* fue un sistema especialmente desarrollado para limpieza de evaporadores en ingenios azucareros.

Su principal ventaja es que la manguera está conectada directamente en el pico rotativo, así se elimina el lanza rígida, que como dicho en último tema, cuando esa está a fuera del tubo su conexión está muy expuesta y así cerca del operador.

Con el *tubojet* un limitador interno (top) bloquea la salida de la manguera de un tubo de protección, por lo que en caso de rompimiento de la conexión, la manguera no podrá golpear el operador.

El *tubojet* está acoplado al pie del operador, así él puede guiar el pico a la entrada del tubo con mucha facilidad.

Figura 29. ***Tubojet***



Fuente: simcagroup. Consulta: noviembre de 2012.

#### **2.4.7.7. Boquillas rotativas**

Eso es el componente que efectivamente quita la incrustación de la cañería.

Es conectado directamente a la lanza o la manguera, limpia uniformemente la extensión del tubo sin dañarlo, una vez que no hay contacto mecánico directo con la pared; proporcionando alta calidad en limpieza.

Su sello es metal-metal y el ajuste de tolerancias entre el barril rotativo y el eje, es centesimal.

Existen diversos tipos de boquillas rotativas, pero para ingenios azucareros se recomienda limpiar y destapar.

- Línea T
- Línea B

#### **2.4.7.8. Boquillas línea T**

Las boquillas línea T son indicadas para limpieza de cañerías incrustadas, pues este tipo de pico solo tiene dos salidas radiales a 90°. Poseen medidas desde Ø 10 milímetros, hasta Ø 75 milímetros, y, con prolongadores hasta 21 pulgadas.

Figura 30. **Boquillas línea T**



Fuente: simcagroup. Consulta: noviembre de 2012.

Figura 31. **Bico T**



Fuente: simcagroup. Consulta: noviembre de 2012.

#### 2.4.7.9. **Boquilla línea B**

Este tipo de pico es recomendado para cañerías tapadas, con sus dos salidas frontales cortan la incrustación, mientras las dos salidas radiales limpian el tubo.

Pueden ser suministradas en diversas medidas desde  $\varnothing$  12 milímetros, hasta  $\varnothing$  45 milímetros, conforme el diámetro del tubo a ser limpio.

Figura 32. **Boquilla línea B**



Fuente: simcagroup. Consulta: noviembre de 2012.

## **2.5. Aplicaciones de la limpieza hidrocínética en la industria azucarera**

La aplicación de la técnica de limpieza hidrocínética en la industria azucarera se enfoca en retirar incrustaciones generadas por los carbonatos y bicarbonatos presentes en el agua, y remover la suciedad en los equipos derivada de la caña de azúcar.

- Calentadores
- Pre evaporadores y evaporadores
- Caldera
- Molienda
- Superficies en general

### **2.5.1. Limpieza en pre-evaporadores y evaporadores**

La limpieza de los preevaporadores y evaporadores es la principal actividad de ese tipo de limpieza en ingenios azucareros.

Para ejecutarla, se cierra la válvula de entrada de vapor y se guarda hasta que se enfríe el vaso (para Ingenios que no detienen las válvulas multivías, se solicita que se informe las características del conjunto para que se haga el dimensionamiento del mejor equipo).

El operador adentra al vaso y con el uso del *tubojet*, introduce la manguera y el pico a la cañería; así mientras el pico gira y baja, limpia toda su extensión.

Para limpieza de evaporadores tipo Roberts, con tubos 4,0 metros de largo, en la media y para efectos de cálculo, se toma 7,0-8,0 segundos por tubo,

(incluso la fatiga del operador) pues no hay contacto mecánico con la pared, así el esfuerzo mayor es bajar la manguera y quitarla.

Así, para una calandria de por ejemplo 30 000 pies<sup>2</sup> y 7 520 tubos:

$8 \text{ segundos} \times 7252 \text{ tubos} = 60\,106 \text{ segundos} / 3\,600 = 17 \text{ horas}$

Con una bomba de 175 HP a la presión de 1 000 BAR y 02 boquillas al mismo tiempo.

Con una bomba de 300 HP a la presión de 1 000 BAR y 03 boquillas al mismo tiempo.

Así  $17 \text{ horas} / 02 \text{ pico} = 9 \text{ horas}$

$17 \text{ horas} / 03 \text{ pico} = 6 \text{ horas}$

## **2.6. Seguridad en la limpieza hidrocínética de evaporadores**

En el equipo, está incluido un entrenamiento referente a la seguridad, operación y mantenimiento a ser ejecutado por propio cliente.

Para el uso de este tipo de tecnología, el sistema ofrece los siguientes aparatos de seguridad:

- Protección electrónica contra rompimiento de manguera (PLC)
- Protección electrónica contra superpresión del sistema (PLC)
- Protección mecánica contra superpresión del sistema (Disco de ruptura)
- Cabos de Seguridad en las mangueras
- Sistema de despresurización a distancia (comando de pie eléctrico)

Equipos de protecciones:

Para seguridad operacional, recomendamos que el operador utilice:

- Ropa de PVC
- Bota con punta en acero
- Guantes plásticos
- Tubojet (para limpieza de evaporadores)
- Casco
- Protector facial
- Tampón de oído

Figura 33. **Equipo de seguridad**



Fuente: simcagroup. Consulta: noviembre de 2012.

## **2.7. Limpieza química de evaporadores**

La limpieza química de evaporadores, utiliza agua, hidróxido de sodio, ácido sulfámico, energía en forma de calor y una cantidad de tiempo considerable de trabajo, para retirar incrustaciones en cañerías.

### **2.7.1. Procedimiento de limpieza química**

Con el objeto de quebrar o quitar los materiales indeseados que se encuentran en las superficies planas y curvas de los evaporadores, el procedimiento es de la siguiente manera:

- Un 30 por ciento w/v NaOH, solución se prepara mediante la adición de la cantidad necesaria de NaOH aproximadamente en 2 metros cúbicos de agua. Para asegurar de que el NaOH se disuelva por completo, se agita mediante la circulación de la solución a través del tubo a limpiar o directamente de vuelta al tanque.
- La solución se rocía sobre la calandria del evaporador a una velocidad de 0,5 litros por cada tubo por minuto. Después de que fluye por los tubos, la solución es devuelta al depósito desde el que se bombea.
- La solución de NaOH se distribuye de esta manera durante cuatro horas. Durante este tiempo, la solución se mantiene a una temperatura de 100 a 105 grados Celcius por medio del vapor aplicado a la calandria.
- Durante la irrigación, se añade agua al tanque, por medio de una válvula de flotador. Se hace para reemplazar el agua que se va por evaporación.

- Más NaOH, se agrega a la solución si la concentración es inferior al 20 por ciento. La concentración de la solución, se determina a través de análisis de laboratorio de muestras tomadas en la pulverización. Una mitad de reposición a través de la pulverización se requiere generalmente.
- Al finalizar el tratamiento con NaOH, el recipiente es lavado meticulosamente con agua para eliminar los restos de sosa cáustica. Esto tarda aproximadamente media hora y el pH del agua que pasa fuera de la embarcación, se mide para determinar si el lavado se ha hecho suficiente.
- De la misma manera que la solución de NaOH se prepara una 2 por ciento w/v solución de ácido sulfámico también de aproximadamente 2 metros cúbicos: lo que se hace en otro tanque.
- Cuando se haya completado el lavado, la solución de ácido se rocía más de la calandria de la misma manera que la solución de NaOH se rocía.
- En el caso de la solución de ácido sulfámico, el rociado es hecho por una hora y la temperatura se mantiene en alrededor de 70 grados Celcius.
- Después de rociar ácido, la calandria se llena de agua que se hierve, tan vigorosamente como sea posible, por una hora. Esto es necesario para eliminar cualquier resto de la escama que, en esta etapa, está sobre todo en la forma de lodo.

- Después del proceso de agua hirviendo, agua fría es rociada en el recipiente para eliminar la acumulación de la escama del espejo, y, para enfriar el recipiente.
- El equipo se abre para inspeccionar los tubos y la calandria, para ser probados. Después este equipo se pone de nuevo en línea.

## **2.8. Ingeniería económica**

La Ingeniería Económica es una especialidad que integra los conocimientos de ingeniería con los elementos básicos de la microeconomía. Su principal objetivo es la toma de decisiones basada en las comparaciones económicas de las distintas alternativas tecnológicas de inversión.

### **2.8.1. Análisis y selección de inversiones**

Para realizar un análisis y selección de inversiones es necesario conocer los conceptos básicos, entre los cuales se encuentran: la inversión, flujo de caja y el beneficio costo.

- Conceptos básicos
  - Inversión: corriente de cobros y pagos que se producen a lo largo de un período de tiempo.
  - Flujo de caja: diferencia entre cobros y pagos.
  - Beneficio: ingresos menos costos (tiene en cuenta las amortizaciones).

El primer flujo de caja en una inversión es siempre negativo, supone un desembolso. La inversión será efectuable cuando los cobros sean superiores a los pagos.

### **2.8.2. Criterio del VAN (Valor Actual Neto o valor capital)**

Es el valor actualizado de todos los flujos de caja. Diferencia entre cobros y pagos.

Como se producen en momentos diferentes es necesario actualizarlos u homogeneizarlos (llevarlos a un mismo momento). Si se utilizan recursos propios es necesario aplicar su coste de oportunidad, (lo que se deja de ganar por no invertir en algo con riesgo similar).

$VAN > 0$  se acepta la inversión; si los proyectos son mutuamente excluyentes, se acepta el que tenga mayor VAN.

### **2.8.3. Criterio de la TIR (Tasa Interna de Rentabilidad, criterio de retorno o Tasa de Rendimiento Interno)**

La Tasa Interna de Retorno o de Rentabilidad (TIR) es un método de valoración de inversiones que mide la rentabilidad de los cobros y los pagos actualizados, generados por una inversión, en términos relativos, es decir en porcentaje.

- Es el tipo de descuento que hace el VAN 0
- Flujos constantes y la inversión ilimitada:  $Q/r$
- Se acepta la inversión si  $r > k$  (tipo de descuento del VAN)
- En proyectos mutuamente excluyentes, se acepta el de mayor.

- VAN y TIR no son independientes:
  - $VAN=0 \Leftrightarrow r=k$
  - $VAN>0 \Leftrightarrow r>k$
  - $VAN<0 \Leftrightarrow r<k$
- VAN mide ganancias brutas, TIR determina rentabilidad.
- VAN y TIR siempre llevan a la misma conclusión en proyectos independientes. Si son mutuamente excluyentes puede haber discrepancias. También puede haber discrepancias cuando hay varias tasas de rentabilidad.
- Hay cambios de signo en los flujos.
- Saldo en cualquier momento  $t$ , descontado al tipo TIR, es positivo.

#### **2.8.4. Tasa Interna de Rentabilidad Modificada**

La modificación, consiste en convertir la inversión no simple en simple, modificando los flujos negativos en positivos; absorbiendo los flujos negativos con positivos, descontándolos al tipo del costo del capital, al año anterior.

Permite calcular la rentabilidad de un proyecto eliminando raíces múltiples pero, no debe ser usada para seleccionar inversiones puesto que el VAN, es más preciso.

### **2.8.5. Otros criterios para seleccionar inversiones**

El VAN y la TIR, tienen en cuenta el factor tiempo y el costo de oportunidad del dinero, el resto de criterios son menos precisos, pero más sencillos y pueden utilizarse si no es necesaria una mucha exactitud.

### **2.8.6. Plazo de recuperación o *PAY-BACK***

Este criterio indica el tiempo que tarda en recuperarse el desembolso inicial de una inversión, sumado los flujos de caja hasta que igualan el desembolso inicial.

Inconvenientes:

- No tiene en cuenta el momento en que se producen los flujos
- No tiene en cuenta los flujos posteriores a la recuperación

### **2.8.7. Tasa de rendimiento contable**

Es un criterio basado en la información contable que relaciona el beneficio neto medio anual, con la inversión media; (aquella que por término medio tiene inmovilizada la empresa en los años de su duración).

- Cuota amortización constante:
  - $\text{Inversión media} = (\text{desembolso inicial} + \text{valor residual}) / 2$
  - $\text{Tasa rendimiento contable} = \text{beneficio neto medio anual} / \text{Im}$
  - $\text{TRC} > \text{que mínima exigida por la empresa} \Rightarrow \text{se efectúa inversión}$

### 3. DISEÑO METODOLÓGICO

#### 3.1. Variables

Para el cumplimiento de los objetivos de la presente investigación, se toma en cuenta el estudio del funcionamiento de los métodos de limpieza hidrocínética y el método de limpieza químico; para lo cual es necesario el análisis de las siguientes variables.

##### 3.1.1. Variables de control

Es un tipo de experimento o prueba controlada en la que con parámetros y componentes conocidos se pretende validar o comprobar los hechos experimentales de una hipótesis.

Tabla I. Definición operacional de variables

Definición operacional de variables				
No.	Variable	Dimensional	Factor potencial de diseño	
			Constantes	Variable
Análisis del método limpieza hidrocínética				
1	Energía eléctrica	Kwatts/h		X
2	Presión	Psi		X
3	tiempo	Horas		X

Continuación de la tabla I.

4	Consumibles			X
5	Mantenimiento		x	
Análisis de método de limpieza química				
1	Consumo de vapor	Lbs/hora		X
2	Químicos	Kilogramos		
3	pH			X
4	Tiempo	Horas		X
5	Consumibles			X
6	Mantenimiento		x	

Fuente: elaboración propia

### 3.1.2. Variables de control independientes

Las variables independientes son aquellas que se conocen al inicio de un experimento o proceso y que no dependen en gran medida de otros factores internos o externos del proceso.

Tabla II. **Definición operacional de variables independientes para los dos tipos de limpieza en estudio**

No.	Nombre	Variable dimensional	Descripción
1	Energía eléctrica	Kwatts/h	Cantidad de energía eléctrica utilizada en los equipos para la limpieza.
2	Tiempo	horas	Tiempo necesario para la limpieza de los evaporadores.
3	Presión	Psi	Presión de operación del equipo de limpieza.
4	Vapor	Lbs/hora	Consumo de vapor utilizado en la limpieza química.

Fuente: elaboración propia

### 3.1.3. Variables de control dependientes

Las variables dependientes son las que se crean como resultado del estudio, experimento o proceso, que depende de forma considerable de otras variables internas o externas del proceso.

Tabla III. **Definición operacional de las variables dependientes para los dos tipos de limpieza en estudio**

<b>Nombre</b>	<b>Variable Dimensional</b>	<b>Descripción</b>
Costo de energía eléctrica	Q/Kwatts/h	Costo total de la energía eléctrica utilizada en los equipos para la limpieza.
Costo de mantenimiento del equipo	Q	Costo del mantenimiento de los equipos utilizados para la limpieza.
Costo de químicos	Q/kilogramo	Costo de los químicos utilizados en la limpieza.
Costo de operación	Q	Costo del uso de personal para la operación del equipo de limpieza.

Fuente: elaboración propia.

### 3.2. Delimitación del campo de estudio

A continuación, se indican las áreas de la ingeniería química que se ven implicadas en la presente investigación; así, como el tipo de proceso, ubicación y el clima que impera en las regiones donde se han recopilado los datos.

- Área: dinámica de procesos químicos, ingeniería económica.

- Proceso: limpieza hidrocínética de evaporadores tipo Roberts en la industria azucarera.
- Ubicación: diferentes ingenios azucareros de Guatemala.
- Clima: 20 – 35 grados Celcius en la ciudad de Guatemala y en las regiones de estudio varía según la región.

### **3.3. Recurso humano disponible**

El recurso humano disponible para la investigación: evaluación comparativa técnica y económica de los métodos de limpieza hidrocínética y limpieza química para evaporadores tipo Roberts en ingenios azucareros, es el siguiente:

Investigador:

Mario José Linares Morales

Asesor de investigación:

Ing. David Ricardo Cerezo Toledo

### **3.4. Recursos materiales disponibles**

A continuación se enumeran los materiales y equipos que fueron necesarios para recopilar, ordenar y procesar los datos que conforman la presente investigación

### 3.4.1. Materiales y equipo

Los materiales y equipos que fueron necesarios para recopilar, ordenar y procesar los datos que conforman la presente investigación son los que se enumeran en el siguiente cuadro:

Tabla IV. **Materiales y equipo disponible para la investigación**

No.	Descripción
1	Papel carta blanco para imprimir
2	Bolígrafos.
3	Casco
4	Bata
5	Computadora portátil
6	Cuadernos para apuntes
7	Marcadores permanentes
8	Botiquín para emergencias
9	Cámara fotográfica
10	Zapatos Industriales
11	Mascarillas
21	Guantes de látex

Fuente: elaboración propia.

### 3.4.2. Presupuesto

En el siguiente cuadro puede observarse el costo de los diferentes equipos y materiales que se utilizaron para poder realizar la presente investigación, así como el costo total del estudio.

Tabla V. Presupuesto

No.	Descripción	Cantidad	Valor unitario (Q)	Valor Total (Q)
1	Papel carta blanco para imprimir.	300	0.10	30
2	Bolígrafos.	3	5	15
3	Casco.	1	50	50
4	Bata.	1	100	100
5	Computadora portátil.	1	4 000	4 000
6	Cuadernos para apuntes.	2	15	30
7	Marcadores permanentes.	3	5	15
8	Botiquín para emergencias.	1	25	25
9	Cámara fotográfica.	1	3 500	3 500
10	Zapatos Industriales.	1	450	450
11	Mascarillas.	5	20	100
12	Guantes de látex.	5	15	75
13	Combustible.	70(gal)	34	2 380
14	Servicio de asesor .	2 meses	2 500	5 000
15	Cartuchos tinta impresora.	2	160	320
16	Alimentación .	3 tiempos	75	225
17	Impresora.	1	600	600
<b>Total</b>			<b>11 554</b>	<b>16 015</b>

Fuente: elaboración propia.

### **3.5. Recolección y ordenamiento de la información**

La información será recopilada gracias a la Empresa Codimerca`s pc, que se dedica al asesoramiento en el campo de automatización de procesos químicos en la industria azucarera. La Empresa permitirá la visita a diferentes ingenios azucareros del país; donde se recopilará información acerca del método de limpieza hidrocínética de evaporadores y el método de limpieza química. Los datos obtenidos estarán formados de costos de operación para las dos técnicas de limpieza.

### **3.6. Procedimiento para poder realizar el estudio económico**

Una vez recopilada la información histórica con base a las variables de control, y el tipo de estudio para los dos métodos de limpieza de evaporadores; se procedió a ordenar dichos datos de una forma adecuada con la finalidad de presentar los datos de forma gráfica y, así, poder realizar un análisis comparativo de dichos métodos.

### **3.7. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información**

En los cuadros que se encuentran a continuación, puede observarse la forma en que se recopilaron, ordenaron y procesaron los datos de la presente investigación para los dos tipos de limpieza de evaporadores.

Tabla VI. **Tablas de datos calculados**

<b>Datos de limpieza hidrocínética</b>				
	Costo \$ por zafra	Costo Día (Q)	Costo total día (Q)	Costo mes 30 días (Q)
<b>COSTO DEL EQUIPO</b>				
costo del equipo	125 000			1 000 000
<b>COSTO DE OPERACIÓN</b>				
<b>Salarios</b>				
Salario 6 personas por turno				
turno				
2:00 pm a 10:00 pm		408		
10:00 pm a 6: am		<u>408</u>		
Total			816	24 480
<b>Consumibles Equipo Hidrocínética zafra</b>				
Costo de consumibles				
meses 1 al 4	14 000			
meses 5 y 6	10 000			
Total			<u>895,79</u>	26 874
<b>Consumo eléctrico</b>				
Costo de consumo eléctrico			<u>1 279,70</u>	38 391
<b>Mantenimiento</b>				
costo mantenimiento	5 000	<u>213,28</u>		<u>6 398,51</u>
			213,28	
Costo total por día			<u>1 925,07</u>	
costo primer mes con inversión inicial en quetzales				<b><u>1 000 000</u></b>

Continuación de la tabla VI.

costo primer mes sin inversión inicial en quetzales				<b><u>105 548,09</u></b>
costo primer mes con inversión inicial en dólares				<b>125 000</b>
costo primer mes sin inversión inicial en dólares				<b>13 194</b>

Fuente: elaboración propia.

Tabla VII. **Costo mensual de limpieza hidrocínética, incluyendo inversión inicial**

<b>Datos costo mensual limpieza hidrocínética incluyendo inversión inicial</b>	
mes	Inversión en dólares
0	125 000,00
1	11 943,51
2	11 943,51
3	11 943,51
4	11 943,51
5	14 443,51
6	14 443,51
VPN Limpieza Hidrocínética incluyendo inversión inicial con inflación del 0,33 por ciento para seis meses en dólares	
VPN (\$)	20 0751,00

Fuente: elaboración propia.

Tabla VIII. **Cálculo de costo energético del equipo hidrocínético**

Cálculo de costo energético del equipo hidrocínética				
hp	kW	horas de trabajo	kW-hora	Costo en dólares
300	232.00	24	5 568,00	1 175,79

Fuente: elaboración propia.

Tabla IX. **Costo mensual limpieza química**

Costo mensual limpieza química		
mes	Inversión (\$)	
1	64 625	
2	64 625	
3	64 625	
4	64 625	
5	64 625	
6	64 625	

Fuente: elaboración propia.

Tabla X. **Cálculo de Valor Presente Neto limpieza química**

Cálculo de Valor Presente Neto limpieza química (\$)		
mes	Inversión en dólares	
1	64 412	
2	64 201	
3	63 989	
4	63 779	
5	63 569	

Continuación de la tabla X.

6	63 360
<b>VPN</b>	<b>383 311</b>

Fuente: elaboración propia.

Tabla XI. **Comparación de Valor Presente Neto**

<b>Comparación de Valor Presente Neto</b>			
Vpn limpieza Hidrocinética 0,33 por ciento de inflación		Vpn limpieza química 0,33 por ciento de inflación	
	Costo en \$		Costo en \$
VPN	200 751	VPN	383 311

Fuente: elaboración propia.

Tabla XII. **Tabla comparativa del comportamiento mensual para las dos técnicas de limpieza**

<b>Tabla comparativa del comportamiento mensual par las dos técnicas</b>			
<b>Limpieza hidrocinética, comportamiento mensual con inversión inicial</b>		<b>Limpieza química, comportamiento mensual con inversión inicial</b>	
mes	Inversión (\$)		(\$)
0	125 000,00	0	64 625
1	11 943,51	1	64 625
2	11 943,51	2	64 625
3	11 943,51	3	64 625
4	11 943,51	4	64 625
5	14 443,51	5	64 625
6	14 443,51	6	64 625

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIII. **Tiempos de limpieza para un evaporador por técnica**

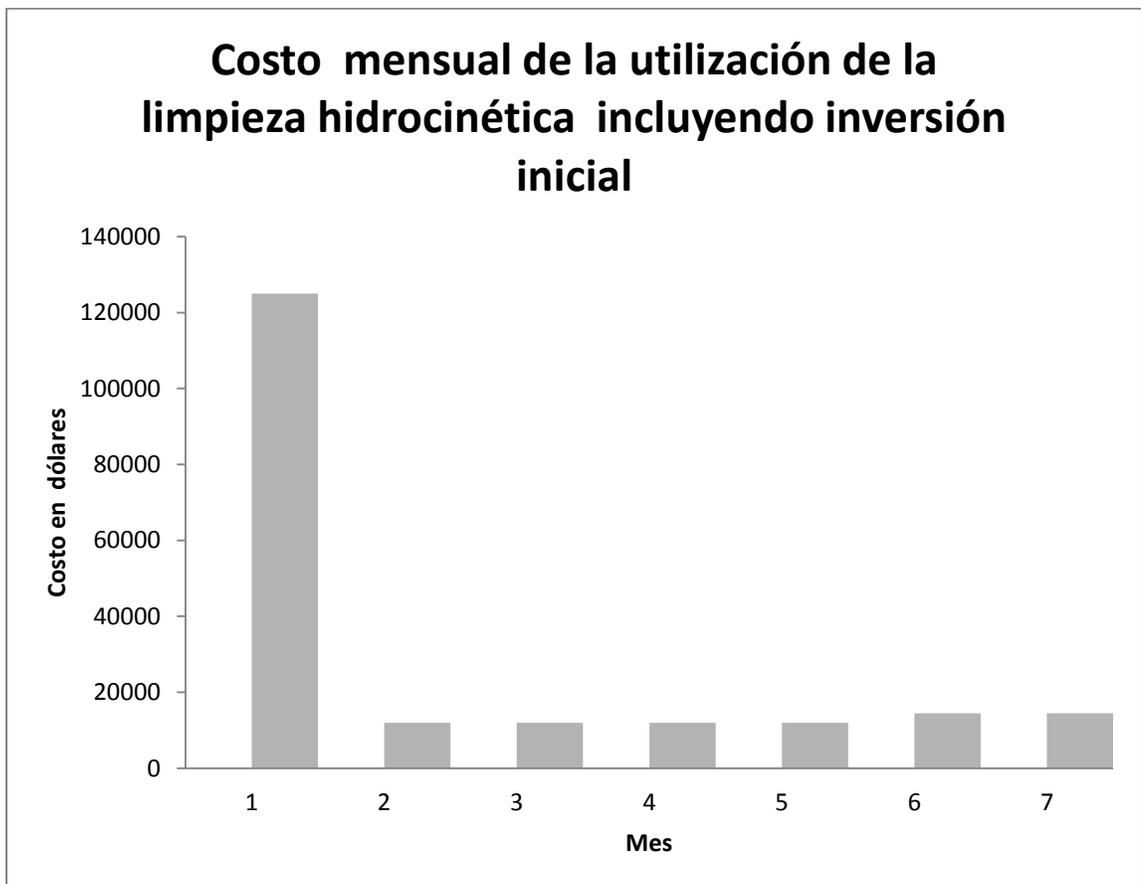
<b>Tiempos de limpieza para un evaporador por técnica</b>	
<b>Limpieza hidrocínética</b>	<b>Limpieza química</b>
horas máximas por evaporador	horas máximas por evaporador
12	24

Fuente: elaboración propia.

## 4. RESULTADOS

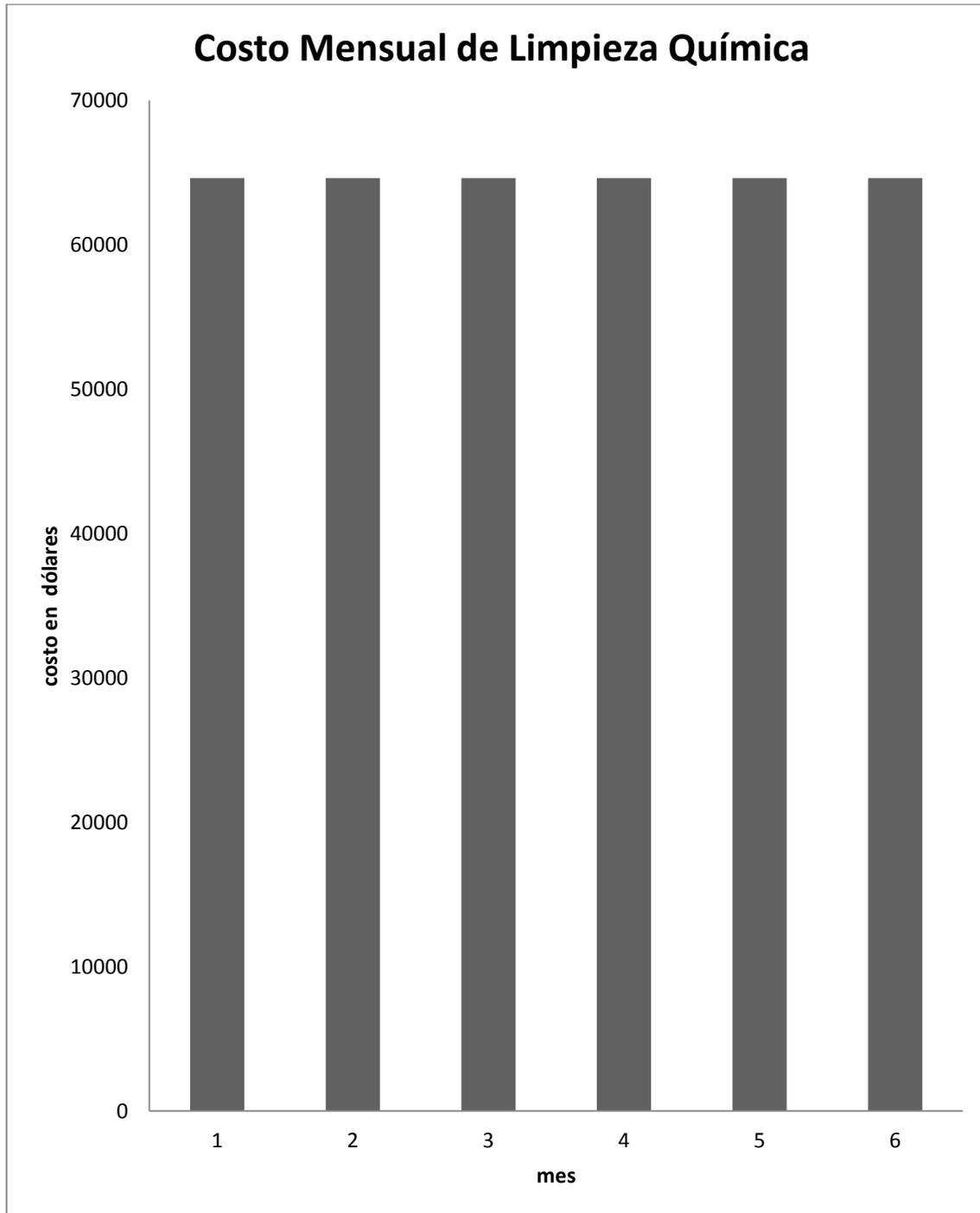
A continuación se presenta el resultado gráfico de la investigación, en la que se encuentra la comparación económica y técnica de los métodos de limpieza hidrocínética y limpieza química para evaporadores tipo Roberts.

Figura 34. **Costo mensual de la utilización de la limpieza hidrocínética incluyendo inversión inicial**



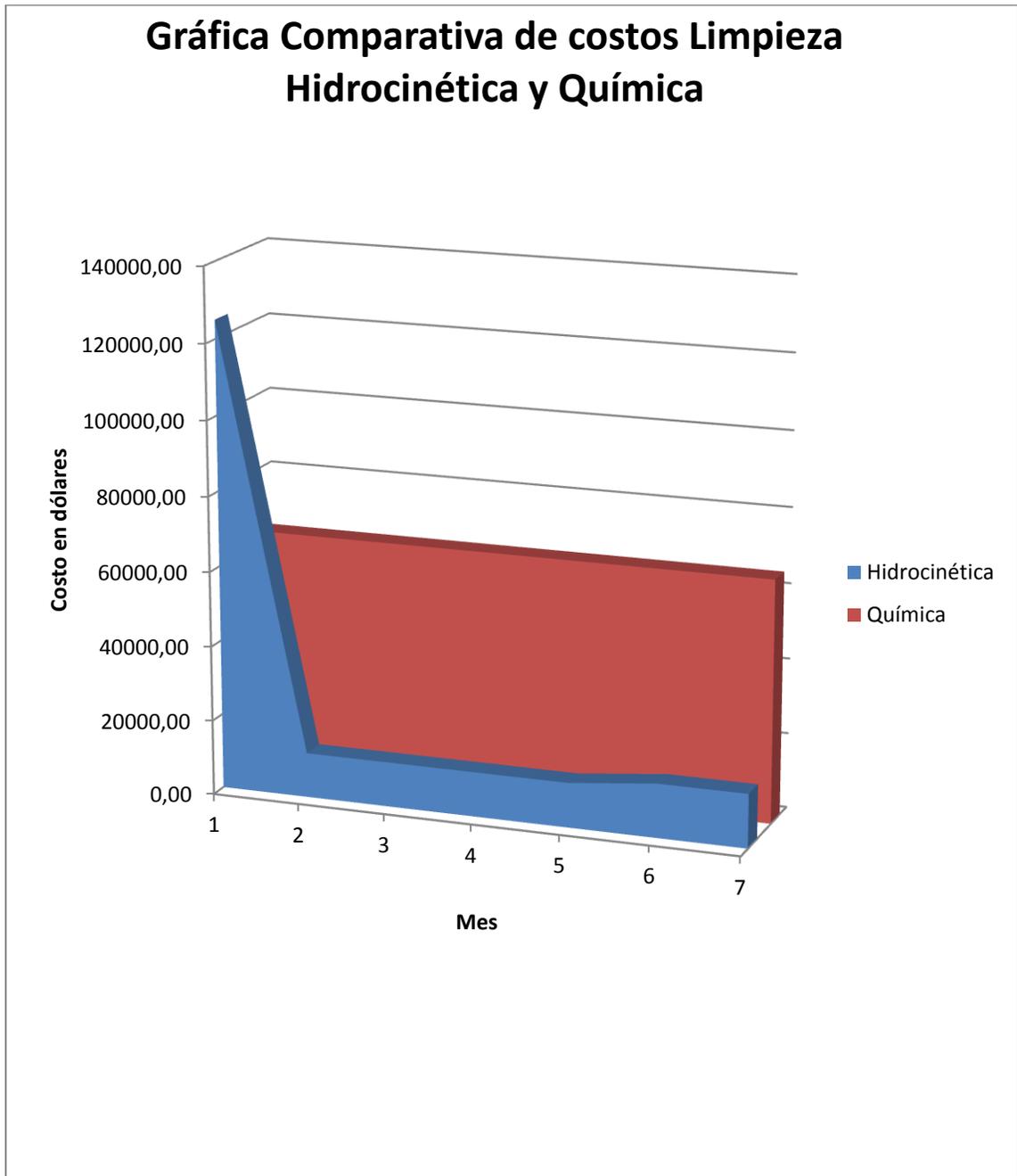
Fuente: elaboración propia.

Figura 35. Costo mensual de limpieza química



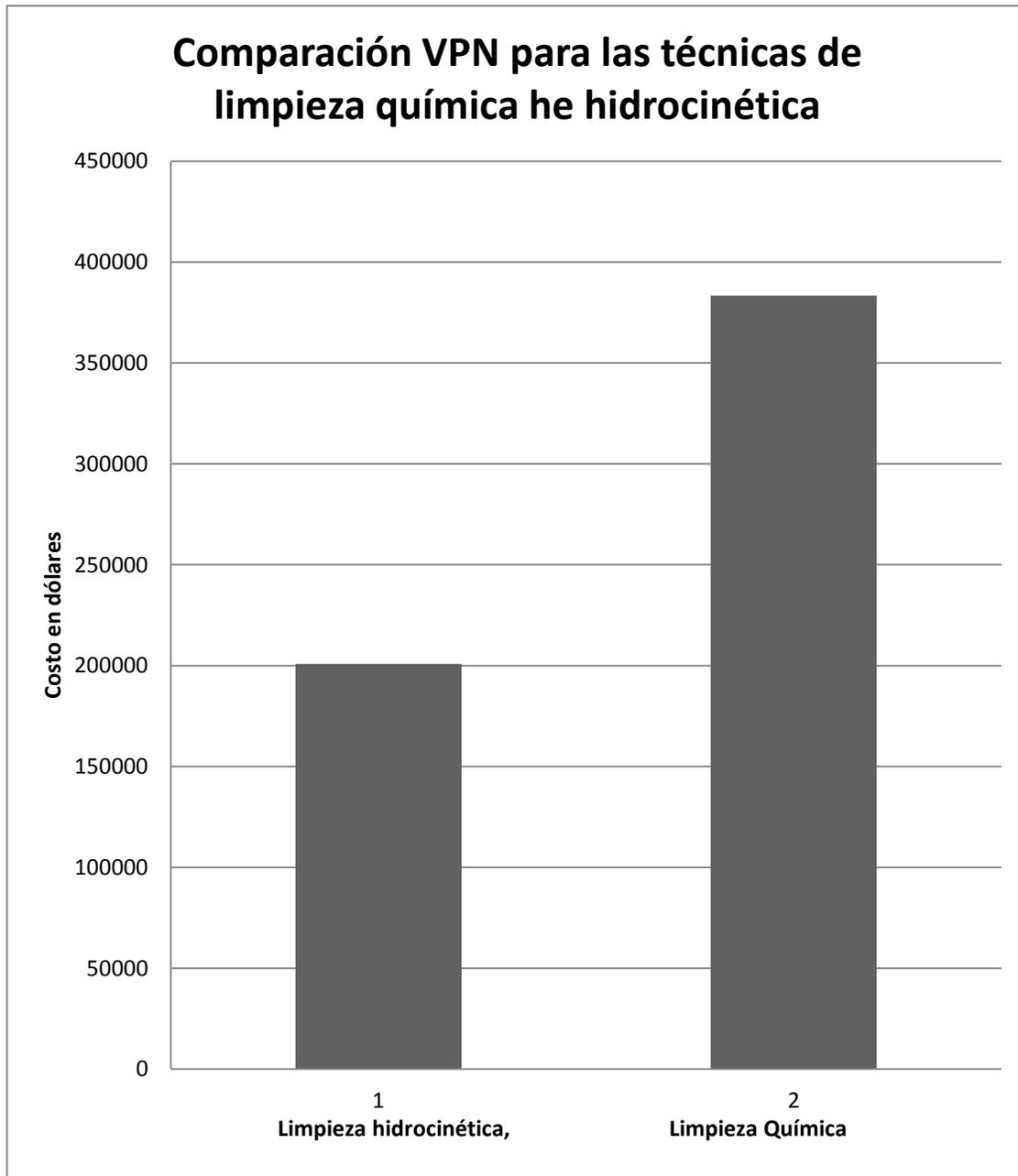
Fuente: elaboración propia.

Figura 36. Gráfica comparativa de costos de limpieza hidrocínética y química



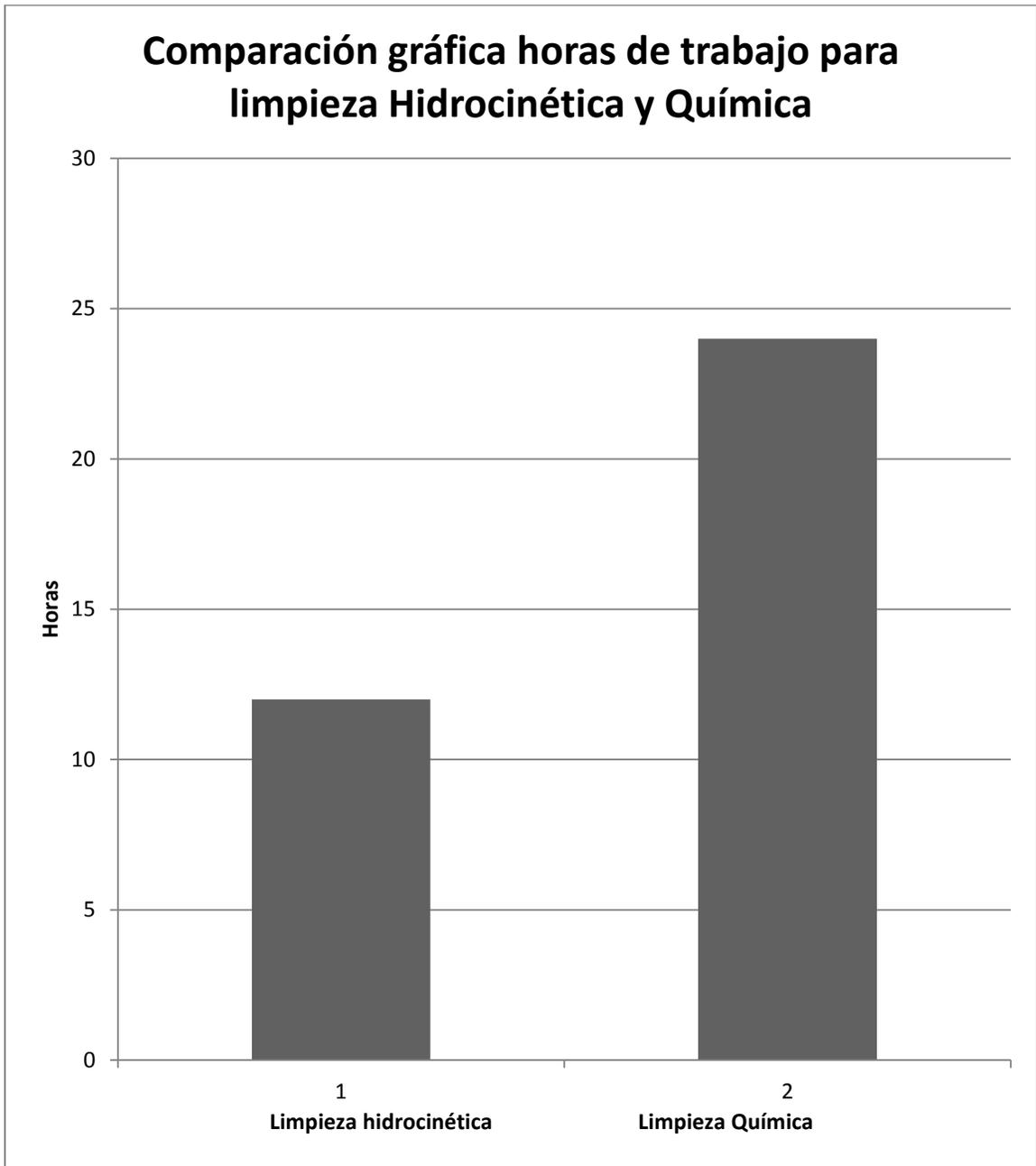
Fuente: elaboración propia.

Figura 37. Comparación VPN para técnicas de limpieza química e hidrocínética



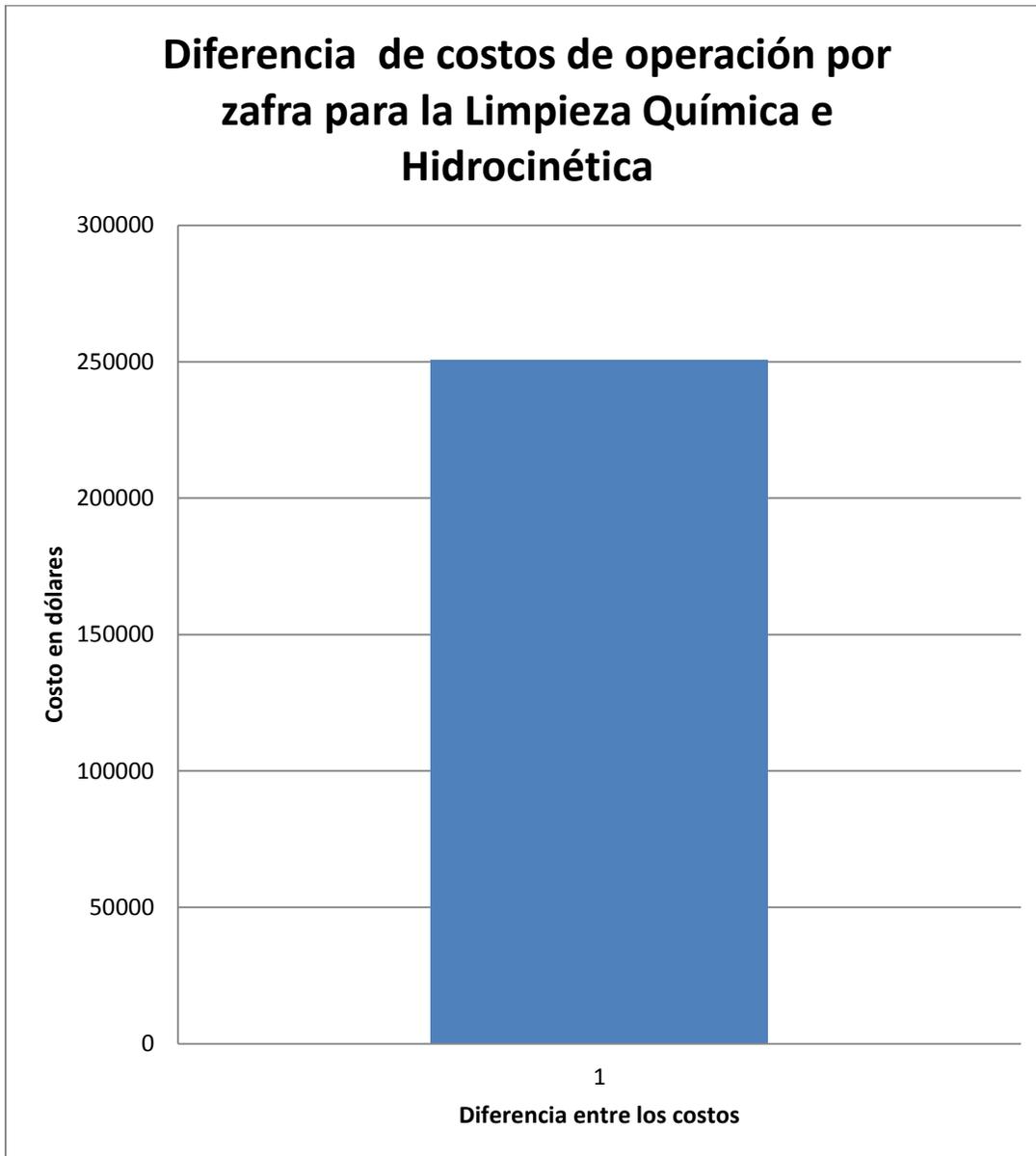
Fuente: elaboración propia.

Figura 38. Comparación gráfica de horas de trabajo para limpieza hidrocínética y química



Fuente: elaboración propia.

Figura 39. **Diferencia de costos de operación por zafra para la limpieza química e hidrocínética**



Fuente: elaboración propia.

## 5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

En todo proceso químico industrial se tiene como tarea obtener los máximos beneficios económicos, por medio de subprocesos que impliquen el menor costo fijo y variable en la ejecución de éstos; sin poner en riesgo la calidad de los productos, la eficiencia del proceso y el medio ambiente.

La presente investigación fue ejecutada en un ingenio azucarero, específicamente en el área del proceso de concentración de solución de sacarosa, el cual es llevado a cabo en evaporadores tipo Roberts o llamados también evaporadores de tubos verticales largos.

Dichos evaporadores se ven afectados por una gran cantidad de incrustaciones derivadas del proceso de evaporación de jugo de caña. Debido a este problema, los encargados de dicho proceso, deben sacar de la línea de evaporadores; un evaporador por día durante la zafra, para retirar las incrustaciones, sin afectar la producción.

Existen dos técnicas que son las más utilizadas para la limpieza de evaporadores:

- Limpieza química
- Limpieza hidrocínética

Limpieza química: éste es un método el cual utiliza grandes cantidades de químicos como hidróxido de sodio y ácido sulfámico entre otros. El tiempo de lavado del evaporador, dura alrededor de 24 horas, lo que se debe a la

complejidad del procedimiento de limpieza como por ejemplo; realizar mezclas, de químicos, calentar y enfriar soluciones, controlar flujos.

Limpieza hidrocínética: este método utiliza la fuerza del agua presurizada para quebrar o quitar materiales indeseados que se agregan a las superficies planas o curvas de los equipos. El equipo consta de una unidad de alta presión, la cual es utilizada para obtener el agua presurizada, el agua presurizada es llevada a los equipos que se van a desincrustar por medio de mangueras diseñadas especialmente para el equipo de alta presión y el trabajo que se realizará. Se anula la utilización de ácido, y, se disminuye a un diez por ciento el uso de hidróxido de sodio. La limpieza de un evaporador tarda aproximadamente doce horas y no requiere de un procedimiento complicado.

Por lo tanto, la presente investigación realizada con apoyo de la Empresa Codimerca's P.C.; tiene como objeto, demostrar las ventajas económicas de la utilización de la limpieza hidrocínética, en comparación con la limpieza química; por lo cual, se procedió a realizar una investigación económica de dichas técnicas.

En la investigación, se tomaron en cuenta costos de equipos, mano de obra, costo de químicos, insumos, costo energético, consumibles, se utilizó teoría de ingeniería económica para analizar las dos técnicas de limpieza de evaporadores.

Según la gráfica 34, de la sección de resultados: costo mensual de la utilización de la limpieza hidrocínética, con inversión inicial, puede observarse un gráfico de costo en dólares, contra tiempo en meses para la utilización de la técnica de limpieza hidrocínética. Inicialmente puede observarse una barra mayor a las subsecuentes; esta sección de la gráfica, indica el inicio de la

utilización de la técnica de limpieza hidrocínética; ya que, en el primer mes se toma en cuenta la compra del equipo e instalación, el cual suma \$125 000,00 más los insumos del primero al cuarto mes de uso, que suman \$11 496,00, y, para los meses cinco y seis, a los que los insumos suben a \$14 443,00; debido a requerimientos por finalización de la zafra.

Según la gráfica 34, de la sección de resultados: costo mensual de la utilización de la limpieza hidrocínética, con inversión inicial, puede observarse una disminución en los costos mensuales y un comportamiento constante después del primer mes, hasta el mes cuatro, del uso del equipo de limpieza hidrocínética; con relación a los costos de los meses cinco y seis, puede observarse un leve incremento.

Consecuentemente, de la compra e instalación del equipo, se incurre a gastos de operación del equipo en los que se cuentan. Consumo de energía eléctrica, salarios de dos grupos de operarios; cada grupo consta de seis personas y se aplicó el salario mínimo y prestaciones de ley, consumibles para el equipo, lubricantes, partes móviles desgastadas, entre otras, que es necesario cambiar durante el proceso de uso del equipo para asegurar el buen funcionamiento de éste. El costo total de operación por mes, para los cuatro primeros meses durante la zafra es de \$ 11 943,00 y, para los meses cinco y seis; es costo de operación mensual, se eleva a \$14 443,00. Debido a requerimientos por finalización de la zafra.

Según la gráfica 35, de la sección de resultados: costo mensual de limpieza química de evaporadores, puede observarse un costo constante durante cada mes, que se utiliza la técnica de limpieza química. Según datos proporcionados por la Empresa Codimerca's PC.; la inversión mensual durante la zafra es de \$ 64 625,00, costo que incluye: compra de ácido

sulfámico, hidróxido de sodio, mano de obra, equipo de protección, equipos como bombas utilizadas para verter las soluciones en los evaporadores, entre otros.

Según la gráfica 37, de la sección de resultados: Valor Presente Neto comparativo para dos inversiones; limpieza hidrocínética y limpieza química de evaporadores tipo Roberts, puede observarse una gráfica comparativa entre el Valor Presente Neto de las dos diferentes inversiones a investigar. Con el objeto de poder determinar y comparar dos tipos de inversiones, se tomó en cuenta un tiempo de trabajo de seis meses y un porcentaje de inflación según el Banco de Guatemala de 0,33 por ciento con fecha 20 de mayo de 2012.

El Valor Presente Neto de la inversión para la técnica de limpieza hidrocínética es de \$ 200 751,00. El valor presente neto para la inversión de la técnica de limpieza química, es de \$ 383 311,00. Según los datos anteriores puede observarse la rentabilidad de la técnica hidrocínética en comparación con la limpieza química de evaporadores. La relación en costo entre limpieza química e hidrocínética es de dos a uno.

Según la gráfica 38, de la sección de resultados: comparación tiempos de limpieza para técnica hidrocínética y química para evaporadores tipo Roberts, se observa una relación dos a uno para los tiempos entre la técnica de limpieza química e hidrocínética. Los tiempos promedio para la limpieza de evaporadores, son de veinticuatro horas con limpieza química y doce horas con limpieza hidrocínética.

Según la gráfica 39, de la sección de resultados: Diferencia de costos de operación por zafra para la limpieza química e hidrocínética, puede observarse que la diferencia en la inversión para las dos técnicas de estudio, es de

\$250 000,00; lo que indica que la sustitución de la limpieza química por la limpieza hidrocínética; presenta un ahorro de un 45 por ciento en costos para la primera zafra, y para zafras posteriores el ahorro aumentaría a un 84 por ciento. La diferencia en los porcentajes de ahorro para la primera zafra, y, las zafras posteriores, utilizando la limpieza química; es debido que para la primera zafra se incluyen los costos compra e instalación del equipo hidrocínético.



## CONCLUSIONES

1. La técnica de limpieza hidrocínética consta de una menor cantidad de pasos para poder realizar su labor en comparación con la técnica de limpieza química.
2. Se demuestra que la técnica de limpieza hidrocínética presenta menores costos económicos que la técnica de limpieza química. La proporción con respecto a costos entre la limpieza química y la limpieza hidrocínética es de dos a uno respectivamente.
3. El Valor Presente Neto, para la técnica de limpieza hidrocínética es de \$ 200 751,00; para un tiempo de seis meses incluyendo inversión inicial.
4. El Valor Presente Neto para la técnica de limpieza química es de \$ 383 311,00, para un tiempo de seis meses.
5. Los tiempos de limpieza para un evaporador utilizando la técnica de limpieza hidrocínética y la técnica de limpieza química; son de doce y veinticuatro horas respectivamente. Se puede observar que existe una relación de uno a dos, con respecto al tiempo de trabajo entre las dos técnicas.
6. La diferencia entre los costos para las dos técnicas de estudio con relación a la primera zafra es de \$ 250 000,00.

7. Para la primera zafra se ahorra un 45 por ciento en costos al sustituir la limpieza química por la técnica de limpieza hidrocínética. Para zafras posteriores el ahorro incrementa a un 84 por ciento.

## RECOMENDACIONES

1. El uso de la limpieza hidrocínética porque este método es ecológicamente correcto.
2. Utilizar el método de limpieza hidrocínética porque se tiene una reducción a la mitad del tiempo; en comparación con la limpieza de un evaporador, utilizando la técnica de limpieza química.
3. Utilizar todos los equipos de seguridad, para tener el mejor funcionamiento del equipo hidrocínético, sin que se suscite ningún tipo de problema.
4. El uso de limpieza hidrocínética, porque reduce los costos de la limpieza de evaporadores en un 45 por ciento en comparación con el método de limpieza química para la primera zafra, y reduce de costos a un 84 por ciento para zafas posteriores.



## BIBLIOGRAFÍA

1. ALVARADO MAGAÑA, Alfredo Alberto. *La administración de sistemas aplicada a un ingenio azucarero*. Universidad Francisco Marroquín. 1990. 73 p.
2. *Atlas del bagazo de la caña de azúcar*. Geplacea/pnud. bilingüe México. 1990. 143 p.
3. Avibert. Blog de Ingeniería [en línea]. [ref. 20 de septiembre de 2011]. Disponible en Web <<http://avibert.blogspot.com/2010/03/handbook-of-cane-sugar-engineering-by-e.html>>. [Consulta: noviembre de 2012]
4. BAIKOW, V. E. *Manufacture and Refining of Raw Cane Sugar. Sugar Series 2*, Elsevier, Amsterdam. 1982, 608 p. ISBN: 0-444-41896-2.
5. BALOH, TONE. Wittwer Enrique. *Energy Manual for Sugar Factories*. Bartens, Berlín. 1995, 202 p. ISBN: 3-87040-055-2.
6. CASTRO PÚ, Juan José. *Establecimiento de controles, para el procedimiento y operación del sistema de limpieza CIP, en la planta de producción de jugos y refrescos, S. A.* Trabajo de graduación de Ing. Industrial. Universidad de San Carlos de Guatemala. 2006, 204 p.

7. CHABALLE, L.Y. *Elsevier's Sugar Dictionary. English/American, French, Spanish, Dutch, German And Latin.* Elsevier, Amsterdam. 1984, 336 p. ISBN: 0-444-42376-1.
  
8. CLARKE. Y M.A. GODSHALL. *Chemistry and processing of sugarbeet and sugarcane. Proceedings Of The Symposium On The Chemistry And Processing Of Sugarbeet,* Denver, CO, USA, 7 April 1987, And *The Symposium On The Chemistry And Processing Of Sugarcane,* New Orleans, LA, USA, 3 September 1987. Editado por M.A. Sugar Series 9. Elsevier, Amsterdam. 1988, 418 p. ISBN: 0-444-43020-2.
  
9. C. P. JAMES CHEN; CHUNG-CHI CHOU. *A Manual For Cane Sugar Manufacturers And Their Chemists.* 12a. ed. Nueva York. John Wiley & Sons, 1993, 1090 p. ISBN: 0-471-53037-9.
  
10. E. HUGOT. *Manual para ingenieros azucareros.* Carlos Ruiz Coutiño. México. Continental. 1984. 803 p.
  
11. ESCAMILLA CÓBAR, Manuel Alberto. *Análisis Energético Integral de Ingenio Santa Teresa, S. A.* Universidad de San Carlos de Guatemala. 2007, 338 p.
  
12. KAPLINSKY, Raphael. *Sugar-processing: the Development of a Third World Technology.* 1983. 148 p.
  
13. KEATING, B. A. WILSON J. R. *Intensive Sugarcane Production. Meeting The Challenges Beyond.* Londres. 2000, 544 p. ISBN: 0-85199-193-9.

14. KERN, Donald Q. *Procesos de transferencia de calor*. México. C.E.C. S. A. 1965, 980 p.
15. LUIS TOVAR, Jorge, *Metodología para la determinación de capacidades de molienda equivalentes en ingenios azucareros*. Geplacea/PNUD. México. 1988, 126 p.
16. MORALES SANTA MARÍA, Oscar Manuel. *Optimización del método de limpieza en el lugar, de la llenadora de una línea de embotellado de una planta industrial de bebidas carbonatadas*. Universidad de San Carlos de Guatemala. 2000, 221 p.
17. Normas ISO, referencias bibliograficas [en línea]. [ref. 20 de septiembre de 2011]. Disponible en web: <<http://www.sibum.cl/archivo>>. [Consultada: noviembre de 2012].
18. PATURAU, J. M. *By-products of the Cane Sugar Industry. An Introduction To Their Industrial Utilization*. Sugar Series 11. Elsevier, Amsterdam. 1989, 446 p. ISBN: 0-444-88214-6.
19. PAYNE, J. H. *Cogeneration in the Cane Sugar Industry*. Sugar Series 12. Elsevier, Amsterdam. 1990, 338 p. ISBN: 0-444-88826-8.
20. PENNINGTON, Neil. *Sugar: a User's Guide to Sucrose*. L. Charles W. Baker. 1990, 348 p.
21. RAMÍREZ FLORES, Claudia Lorena. *Evaluación y diseño de un sistema de limpieza sub-contratado en la planta de producción de pastas*

*alimenticias*. Trabajo de graduación de Ing. Industrial. Universidad de San Carlos de Guatemala. 2008, 104 p.

22. TROMP, L. A. *Machinery and Equipment of the Cane Sugar Factory*. XII. Norman Rodger Editor. Londres. 1936, 644 p.

## APÉNDICES

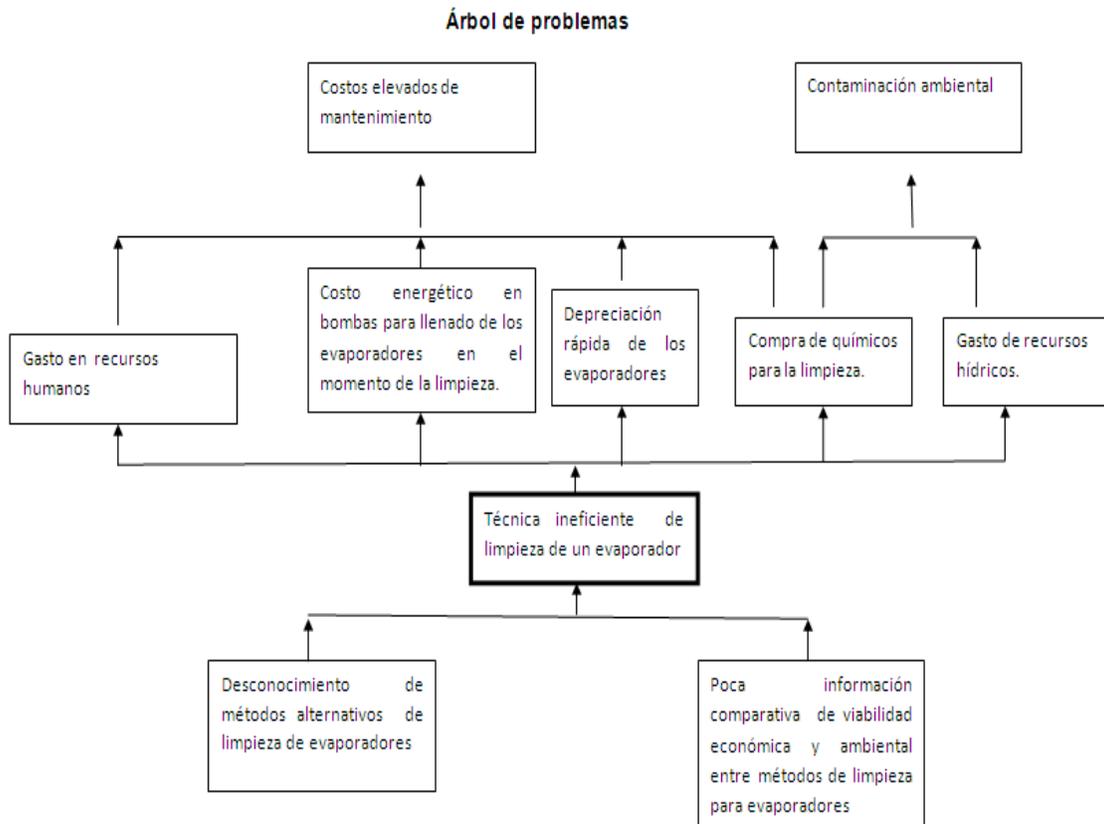


## Apéndice 1. Requisitos académicos

Área	Cursos
Química	Química 3
	Química 4
	Análisis Cualitativo
	Análisis Cuantitativo
	Química Ambiental
Fisicoquímica	Fisicoquímica 1
	Fisicoquímica 2
	Laboratorio Fisicoquímica 1
	Laboratorio Fisicoquímica 2
	Termodinámica 3
	Cinética de procesos químicos
	Termodinámica 4
	Dinámica de procesos químicos
	Cinética de de procesos químicos
	Ecología
Operaciones Unitarias	IQ 1. Balance de masa y energía
	IQ 2. Flujo de Fluidos
	IQ 3. Transferencia de calor
	IQ 4. Transferecia de masa
	IQ5 Transferencia de masa en unidades continuas
	Laboratorio de Operaciones Unitarias 1
	Laboratorio de Operaciones Unitarias 2
	Diseño de Equipo
	Diseño de Plantas
Ciencias Básicas y Complementarias	Matemática Básica 1
	Matemática Básica 2
	Matemática Intermedia 1
	Estadística 1
	Estadística 2
	Física Básica
	Física 1
	Ingeniería Económica 3

Fuente: elaboración propia.

## Apéndice 2. Árbol de problemas



Fuente: elaboración propia.