



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

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA PILETA DE ENFRIAMIENTO PARA UN SISTEMA
DE RECIRCULACIÓN DE AGUAS PROVENIENTES DE LOS CONDENSADORES DE
EVAPORADORES Y TACHOS DE UN INGENIO AZUCARERO**

Luis Pedro Ericastilla Recinos

Asesorado por el Ing. Pablo Fabián Escobar Grajeda

Guatemala, octubre de 2018

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA PILETA DE ENFRIAMIENTO PARA UN SISTEMA
DE RECIRCULACIÓN DE AGUAS PROVENIENTES DE LOS CONDENSADORES DE
EVAPORADORES Y TACHOS DE UN INGENIO AZUCARERO**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

LUIS PEDRO ERICASTILLA RECINOS
ASESORADO POR EL ING. PABLO FABIÁN ESCOBAR GRAJEDA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO

GUATEMALA, OCTUBRE DE 2018

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Oscar Humberto Galicia Nuñez
VOCAL V	Br. Carlos Enrique Gómez Donis
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Carlos Salvador Wong Davi
EXAMINADOR	Ing. Sergio Alejandro Recinos
EXAMINADOR	Ing. Estuardo Edmundo Monroy Benítez
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

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:

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA PILETA DE ENFRIAMIENTO PARA UN SISTEMA DE RECIRCULACIÓN DE AGUAS PROVENIENTES DE LOS CONDENSADORES DE EVAPORADORES Y TACHOS DE UN INGENIO AZUCARERO

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha 23 de septiembre de 2016.



Luis Pedro Ericastilla Recinos

Guatemala 05 de febrero de 2018

Ingeniero

Carlos Salvador Wong Davi

Director Escuela Ingeniería Química

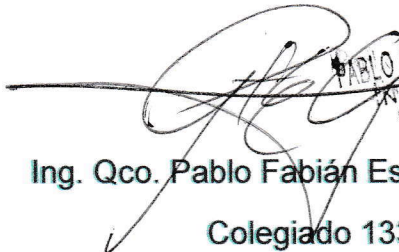
Universidad de San Carlos de Guatemala

Estimado Ing. Wong

Deseándole éxitos en sus actividades diarias, me dirijo a usted para hacer de su conocimiento que he aprobado el informe final del Trabajo de Graduación del estudiante de la carrera de Ingeniería Química, **Luis Pedro Ericastilla Recinos** quien se identifica con número de carné **201213204** y CUI **2501693040101**, titulado: **“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA PILETA DE ENFRIAMIENTO PARA UN SISTEMA DE RECIRCULACIÓN DE AGUAS PROVENIENTES DE LOS CONDENSADORES DE EVAPORADORES Y TACHOS DE UN INGENIO AZUCARERO”**.

Agradeciendo la atención a la presente,

Atentamente,


Ing. Qco. Pablo Fabián Escobar Grajeda
Colegiado 1339
Asesor

PABLO FABIAN ESCOBAR GRAJEDA
INGENIERO QUIMICO
COLEGIADO 1339



Guatemala, 12 de febrero de 2018.
Ref.EPS.DOC.145.02.18.

Inga. Christa del Rosario Classon de Pinto
Directora Unidad de EPS
Facultad de Ingeniería
Usac.

Inga. Classon de Pinto:


Por este medio atentamente le informo que como Asesor-Supervisor de la Práctica del Ejercicio Profesional Supervisado (E.P.S.), del estudiante universitario **Luis Pedro Ericastilla Recinos** de la Carrera de Ingeniería Química, con carné No. **201213204**, procedí a revisar el informe final, cuyo título es **“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA PILETA DE ENFRIAMIENTO PARA UN SISTEMA DE RECIRCULACIÓN DE AGUAS PROVENIENTES DE LOS CONDENSADORES DE EVAPORADORES Y TACHOS DE UN INGENIO AZUCARERO”**.

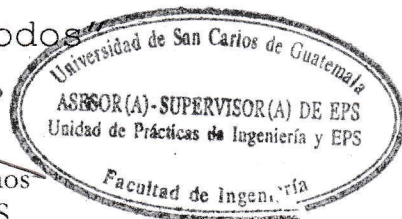
En tal virtud, **LO DOY POR APROBADO**, solicitándole darle el trámite respectivo.

Sin otro particular, me es grato suscribirme.

Atentamente,

“Id y Enseñad a Todos”


Ing. Sergio Alejandro Recinos
Asesor-Supervisor de EPS
Área de Ingeniería Química



c.c. Archivo
SAR/ra



Guatemala, 12 de febrero de 2018.
Ref.EPS.D.48.02.18.

Ing. Carlos Salvador Wong Davi
Director Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería
Presente

Estimado Ingeniero Wong Davi.

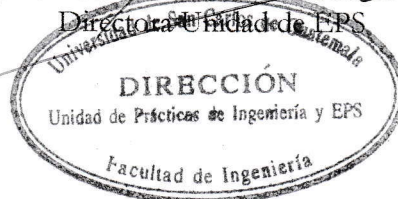
Por este medio atentamente le envío el informe final correspondiente a la práctica del Ejercicio Profesional Supervisado, (E.P.S) titulado **"DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA PILETA DE ENFRIAMIENTO PARA UN SISTEMA DE RECIRCULACIÓN DE AGUAS PROVENIENTES DE LOS CONDENSADORES DE EVAPORADORES Y TACHOS DE UN INGENIO AZUCARERO"** que fue desarrollado por el estudiante universitario Luis Pedro Ericastilla Recinos, quien fue debidamente asesorado y supervisado por el Ingeniero Sergio Alejandro Recinos.

Por lo que habiendo cumplido con los objetivos y requisitos de ley del referido trabajo y existiendo la aprobación del mismo por parte del Asesor - Supervisor de EPS, en mi calidad de Directora apruebo su contenido solicitándole darle el trámite respectivo.

Sin otro particular, me es grato suscribirme.

Atentamente,
"Id y Enseñad a Todos"


Inga. Christa del Rosario Classon de Pinto
Directora Unidad de EPS



CdRCdP/ra



Guatemala, 27 de agosto de 2018.
 Ref. EIQ.TG-IF.033.2018.

Ingeniero
 Carlos Salvador Wong Davi
 DIRECTOR
 Escuela de Ingeniería Química
 Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero Wong:

Como consta en el registro de evaluación del informe final EIQ-PRO-REG-007 correlativo **010-2017** 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
-Modalidad Ejercicio Profesional Supervisado con Seminario de Investigación-

Solicitado por el estudiante universitario: **Luis Pedro Ericastilla Recinos**.
 Identificado con número de carné: **2501 69304 0101**.
 Identificado con registro académico: **2012-13204**.
 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:

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA PILETA DE ENFRIAMIENTO PARA UN SISTEMA DE RECIRCULACIÓN DE AGUAS PROVENIENTES DE LOS CONDENSADORES DE EVAPORADORES Y TACHOS DE UN INGENIO AZUCARERO

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por el Ingeniero Químico: **Pablo Fabián Escobar Grajeda**.

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 ENSEÑADA A TODOS"


 Ing. Jorge Emilio Godínez Lemus
 COORDINADOR DE TERNA
 Tribunal de Revisión
 Trabajo de Graduación



C.c.: archivo





Ref.EIQ.TG.031.2018

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 **Ejercicio Profesional Supervisado (EPS final) de la carrera de Ingeniería Química** del (la) estudiante, **LUIS PEDRO ERICASTILLA RECINOS** titulado: **"DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA PILETA DE ENFRIAMIENTO PARA UN SISTEMA DE RECIRCULACIÓN DE AGUAS PROVENIENTES DE LOS CONDENSADORES DE EVAPORADORES Y TACHOS DE UN INGENIO AZUCARERO"**. Procede a la autorización del mismo, ya que reúne el rigor, la secuencia, la pertinencia y la coherencia metodológica requerida.

"Id y Enseñad a Todos"

Ing. Carlos Salvador Wong Davi
Director
Escuela de Ingeniería Química

Guatemala, octubre de 2018
FACULTAD DE INGENIERIA USAC
ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA
DIRECTOR


Cc: Archivo
CSWD/ale





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: **DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA PILETA DE ENFRIAMIENTO PARA UN SISTEMA DE RECIRCULACIÓN DE AGUAS PROVENIENTES DE LOS CONDENSADORES DE EVAPORADORES Y TACHOS DE UN INGENIO AZUCARERO**, presentado el estudiante universitario: **Luis Pedro Ericastilla Recinos**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:


Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Decano

Guatemala, octubre de 2018

/gdech



ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Por ser el pilar principal en mi vida. Toda la gloria y honra a Él por darme la sabiduría y la inteligencia para concluir esta etapa de mi vida.
- Mis padres** Francisco Ericastilla y Mary de Ericastilla. Por darme su amor y apoyo incondicional siempre. Este triunfo es nuestro.
- Mi hermano** Juan Marcos Ericastilla. Por ser mi mejor amigo, una persona importante y especial en mi vida.
- Fam. Alfaro Soto** Por todo su apoyo incondicional durante mi carrera. Son mi segunda familia.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por ser mi casa de estudios y abrirme las puertas para formarme como profesional.
Facultad de Ingeniería	Por darme las herramientas necesarias para aprender la ingeniería química.
Jessy Alfaro	Por ser mi apoyo, mi ayuda, mi amiga, mi todo durante estos 5 años. Este triunfo también es tuyo.
Ing. William Fagiani	Por ser un gran maestro y amigo. La termodinámica no sería lo mismo sin usted.
Mis amigos	Andrea Aldana, César Quiroz, Andrea Beteta, Paola Delcompare, Juan Francisco Chajón, Rodolfo Martínez, Benjamín Cancinos y Alejandra Pineda, por todos los momentos alegres y divertidos que compartimos.
Ingenio Pantaleón	Por abrir sus puertas y darme el apoyo para realizar mi EPS.
Mi asesor	Pablo Escobar, por el apoyo brindado durante la realización de mi EPS y por compartir su conocimiento sobre la ingeniería química.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
RESUMEN	XI
OBJETIVOS	XIII
HIPÓTESIS	XIV
INTRODUCCIÓN	XV
1. ANTECEDENTES	1
1.1. Justificación	2
1.2. Formulación y delimitación del problema	2
1.3. Alcances o límites	3
2. MARCO TEÓRICO	5
2.1. Proceso del azúcar	5
2.1.1. Extracción de jugo	5
2.1.2. Tratamiento de jugo	5
2.1.3. Recuperación de azúcar	6
2.2. Evaporación	6
2.3. Cristalización	7
2.4. Evaporadores y tachos	8
2.4.1. Evaporadores	8
2.4.1.1. Evaporadores tipo Robert	8
2.4.1.2. Evaporación con múltiple efecto	9
2.4.2. Tachos	12

	2.4.2.1.	Tachos de calandria (discontinuos)	12
2.5.		Condensadores en la industria azucarera	13
2.6.		Sistemas de enfriamiento	15
	2.6.1.	Torre de enfriamiento	16
	2.6.2.	Pileta de enfriamiento (<i>Spray Pond</i>).....	17
2.7.		Ventajas y desventajas de torre y pileta de enfriamiento.....	18
2.8.		Principios de transferencia de calor y masa en pileta de enfriamiento	19
2.9.		Bombas centrífugas.....	22
	2.9.1.	Cabeza neta de succión positiva	22
	2.9.2.	Carga estática	24
	2.9.3.	Carga dinámica	24
	2.9.4.	Potencia.....	24
2.10.		Tratamiento de agua en pileta de enfriamiento	24
	2.10.1.	Crecimiento microbiano	25
	2.10.2.	Incrustaciones	25
		2.10.2.1. Tratamiento ácido	27
		2.10.2.2. Tratamiento alcalino	27
	2.10.3.	Corrosión	28
2.11.		Situación actual del agua en Guatemala	29
2.12.		Leyes de agua en Guatemala	31
3.		MARCO METODOLÓGICO	35
	3.1.	Variables	35
	3.2.	Delimitación del campo de estudio	35
	3.3.	Recursos humanos disponibles	36
	3.4.	Recursos materiales disponibles	36
		3.4.1. Materia prima.....	36
		3.4.2. Equipo.....	36

3.4.3.	Maquinaria.....	37
3.4.4.	Infraestructura	37
3.5.	Técnica cualitativa/cuantitativa	38
3.6.	Recolección y ordenamiento de la información.....	38
3.6.1.	Información primera fase	38
3.6.2.	Información segunda fase.....	39
3.7.	Tabulación, ordenamiento, y procesamiento de la información	39
3.7.1.	Datos primera fase.....	40
3.7.2.	Datos segunda fase	41
3.8.	Análisis estadístico	42
3.8.1.	Media aritmética	43
3.8.2.	Desviación estándar.....	43
3.8.3.	Coeficiente de variabilidad.....	43
4.	RESULTADOS.....	45
4.1.	Etapa de diseño.....	45
4.2.	Etapa de Implementación.....	46
5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	51
6.	LOGROS OBTENIDOS	55
	CONCLUSIONES	57
	RECOMENDACIONES	59
	BIBLIOGRAFÍA.....	61
	APÉNDICES	63
	ANEXOS	91

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Esquema de evaporador tipo Robert	9
2.	Sistema evaporadores múltiple efecto	10
3.	Esquema de tacho de calandria.....	13
4.	Esquema de condensador barométrico a contracorriente	15
5.	Esquema de torre de refrigeración.....	16
6.	Esquema de pileta de enfriamiento	18
7.	Gráfico de control temperatura agua entrada a enfriador	47
8.	Gráfico de control temperatura agua salida de enfriador.....	47
9.	Gráfico de control flujo de agua de río a ingenio.....	48
10.	Presión de agua entrada a enfriador en función de la temperatura de salida de enfriador	48
11.	Presión de agua entrada a enfriador en función del caudal de agua de río a ingenio	49
12.	Diagrama del proceso de recirculación y enfriamiento	50

TABLAS

I.	Ventajas y desventajas torre de enfriamiento	19
II.	Ventajas y desventajas pileta de enfriamiento	19
III.	Índices de estabilidad de Ryznar	26
IV.	Variables de manejo de proyecto.....	35
V.	Datos operativos de condensadores obtenidos de zafras anteriores....	40
VI.	Área de transferencia de calor de evaporadores último efecto	40

VII.	Datos para pileta de enfriamiento	40
VIII.	Datos de niveles de suelo	40
IX.	Datos obtenidos PI DATA LINK	41
X.	Parámetros de diseño de bomba centrífuga.....	45
XI.	Parámetros de diseño de pileta de enfriamiento	45
XII.	Análisis financiero.....	46
XIII.	Promedio aritmético, desviación estándar y coeficiente de variación de las variables del proyecto.....	46
XIV.	Eficiencia real pileta de enfriamiento	46

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
E	Agua evaporada
a	Agua perdida por arrastre
A	Área
S	Área sección transversal
q	Capacidad de boquilla
C_p	Capacidad calorífica
Q	Caudal
K	Coefficiente resistencia de accesorios
C	Coefficiente rugosidad
ρ	Densidad
D	Diámetro
η	Eficiencia
ΔH_{vap}	Entalpía de vaporización
f	Factor de fricción de Darcy
m_w	Flujo másico
\$	Flujo de dinero
g	Gravedad
L	Longitud
m	Metro
Re	Número de Reynolds
h_f	Pérdidas por fricción
W	Potencia
P	Presión

H	Presión cabeza de agua
ϵ	Rugosidad absoluta
T	Temperatura
TBH	Temperatura bulbo húmedo
t	Tiempo
u	Velocidad
μ	Viscosidad dinámica

GLOSARIO

Aspersor	Dispositivo mecánico que comúnmente transporta un flujo líquido presurizado y lo transforma en rocío.
Bomba centrífuga	Tipo de bomba hidráulica que transforma la energía mecánica de un impulsor en energía cinética o de presión de un fluido incompresible.
Boquilla	Tubo adicional de pequeña longitud que se utiliza para dirigir el chorro de un líquido.
Caudal	Cantidad de fluido que circula a través de una sección de una tubería por unidad de tiempo.
Condensador	Equipo que se utiliza en la industria azucarera para condensar el vapor proveniente de los evaporadores para producir vacío en el sistema; también utilizado en los tachos.
Evaporador	Intercambiador de calor donde se produce la transferencia de energía térmica desde un medio por ser enfriado hacia el fluido refrigerante que circula en el interior del dispositivo.
Nivel	Altura a la cual llega la superficie de un líquido.

Presión	Es una magnitud física que mide la proyección de la fuerza en dirección perpendicular por unidad de superficie y sirve para caracterizar cómo se aplica una determinada fuerza resultante sobre una línea.
Ramal	Tramo de tubería que se extiende a partir de otra tubería principal, la cual se utiliza para distribuir el líquido hacia distintos puntos.
Tacho	Equipos que se utilizan en la industria azucarera para la cocción de la meladura para obtener los granos de azúcar.
Temperatura	La temperatura es una magnitud física que refleja la cantidad de calor, ya sea de un cuerpo, de un objeto o del ambiente.
Transmisor	Dispositivo que responde a una variable medida por un elemento sensor y convierte esta a una señal de transmisión estándar que es función de la variable medida.
Válvula	Dispositivo que abre o cierra el paso de un fluido por un conducto en una máquina o aparato.
Variable	Parámetros de los procesos que cambian constantemente debido a las condiciones del mismo.

RESUMEN

Con el objetivo principal de diseñar un sistema de enfriamiento y recirculación de aguas para los condensadores de evaporadores y tachos en un ingenio azucarero, se realizó un proyecto en el cual se pudieran recircular los condensados que se obtienen del área de evaporadores y tachos, acondicionándolos para reutilizarlos en el proceso de elaboración de azúcar.

Para realizar el proyecto, se dividió en dos fases. En la primera se recolectaron los datos necesarios, se calculó el diseño de los equipos por utilizar, los cuales incluyen las bombas centrífugas empleadas para la recirculación del agua y la pileta de enfriamiento como sistema de enfriamiento. Al tener los parámetros de diseño, se procedió a realizar la segunda fase, que comprende la implementación y evaluación del sistema de recirculación y enfriamiento. Para ello, se instalaron 600 metros de tubería de hierro negro y 6 bombas centrífugas; así mismo, se construyó una pileta de enfriamiento y se instaló en ella ramales de tubería con el sistema de aspersión. Posterior al montaje y construcción de los equipos e infraestructura, se evaluó el sistema de recirculación y enfriamiento en el periodo de zafra.

A partir de las mediciones realizadas se determinó que la temperatura del agua, tanto a la entrada como a la salida de la pileta de enfriamiento en el sistema de recirculación y enfriamiento, es operacionalmente constante. Así mismo, que el consumo de agua a partir del día 43 de zafra aproximadamente tuvo una mejora significativa.

OBJETIVOS

General

Diseñar un sistema de enfriamiento y recirculación para el agua de enfriamiento de los condensadores de los evaporadores y tachos de un ingenio azucarero.

Específicos

1. Analizar la producción de condensados en el proceso de elaboración de azúcar.
2. Comparar el sistema de enfriamiento actual y el sistema de enfriamiento propuesto.
3. Analizar los parámetros de operación del sistema de recirculación y enfriamiento de aguas.
4. Efectuar un análisis financiero del sistema de recirculación y enfriamiento de aguas.
5. Realizar pruebas de validación para el sistema de recirculación y enfriamiento de aguas posterior a su implementación.

Hipótesis

Hipótesis de investigación

Existe dependencia lineal significativa entre la presión ejercida por las bombas centrífugas en los ramales y el caudal de agua recirculada. El caudal de agua recirculada es independiente de la presión ejercida por las bombas centrífugas en los ramales.

Existe dependencia lineal significativa entre la presión ejercida por las bombas centrífugas en los ramales y la temperatura del agua recirculada. La temperatura del agua recirculada es independiente de la presión ejercida por las bombas centrífugas en los ramales.

Hipótesis nula

No hay dependencia lineal significativa entre la presión ejercida por las bombas centrífugas en los ramales y el caudal de agua recirculada. El caudal de agua recirculada depende de la presión ejercida por las bombas centrífugas en los ramales.

No hay dependencia lineal significativa entre la presión ejercida por las bombas centrífugas en los ramales y la temperatura del agua recirculada. La temperatura del agua recirculada depende de la presión ejercida por las bombas centrífugas en los ramales.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el uso y disposición del agua ha sido tema de problemática nacional. Esto se debe a la mala disposición de aguas domésticas e industriales, falta de planificación en el uso de los recursos hídricos y deforestación. En el caso de las industrias, estas disponen de forma incorrecta los efluentes en sus plantas de producción; además, demandan una gran cantidad de agua para sus procesos, la cual es tomada de ríos, lagunas, lagos o bien algún manto acuífero cercano a donde lo necesiten.

A raíz de este problema, en los últimos años se ha propiciado por parte de varios ministerios, una iniciativa para que existan leyes en Guatemala que regulen el uso, calidad y disposición de las aguas en los distintos procesos industriales. Sin embargo, a pesar de que dichas leyes aún no se encuentran vigentes, el sector industrial en general ha tomado consciencia de ello y por lo tanto se ha dado a la tarea de implementar proyectos en las respectivas áreas de producción, con el fin de adecuarlas para que, cuando estas leyes sean vigentes, puedan cumplir con las mismas. En este punto, las empresas los realizan más por compromiso ambiental que por obligación legal.

Ahora bien, enfocándose en la industria azucarera, los ingenios demandan una gran cantidad de agua para el proceso del azúcar. Se utiliza en varias partes del proceso, como el lavado de caña, las torres de enfriamiento, entre otras.

Sin embargo, como se mencionaba anteriormente, los ingenios han iniciado a implementar mecanismos con los cuales puedan tomar el agua de su proceso y reutilizarla, con el fin primordial de disminuir el consumo del agua que se toma de las distintas fuentes naturales y la contaminación térmica del agua.

Por lo anteriormente descrito, se propone el diseño e implementación de una pileta de enfriamiento de agua para los condensadores de los evaporadores y tachos de un ingenio azucarero, con lo cual se puedan recircular dichos condensados hacia la toma de agua que se realiza de los ríos.

1. ANTECEDENTES

El Ingenio Pantaleón se encuentra localizado en el kilómetro 86,5 carretera al Pacífico, Siquinalá, Escuintla, Guatemala. Cuenta actualmente con una capacidad instalada de molienda de 29 000 toneladas por día; produce 492 000 toneladas de azúcar y 73 600 metros cúbicos de alcohol por zafra. Además, cuenta con una planta generadora de electricidad que le permite genera y vender 258 300 kilowatts-hora. Todo lo descrito, en un tiempo de zafra de 184 días aproximadamente. Grupo Pantaleón cuenta en la actualidad con varios ingenios azucareros a lo largo de América Latina, como Ingenio Concepción (Guatemala), Ingenio Panuco (México), Ingenio Monte Rosa (Nicaragua), Ingenio Vale do Paraná (Brasil) e Ingenio La Grecia (Honduras).

De los descritos, Pantaleón es el que cuenta con una mayor capacidad instalada, lo cual le demanda utilizar una gran cantidad de agua que es tomada de ríos aledaños a la fábrica. Por ello, se ha dado a la labor, en los últimos años, de implementar sistemas con los que se pueda reutilizar el agua. Actualmente cuenta con torres de enfriamiento que le permite cumplir hasta cierto punto con dicha tarea.

Sin embargo, además de Pantaleón, en el ámbito de las industrias azucareras, también debido a las grandes demandas de agua que exige el proceso de producción de azúcar y sus derivados, durante los últimos años se han implementado sistemas de enfriamiento y recirculación de agua. Así, ingenios como La Unión, San Diego y Magdalena, por poner algunos ejemplos, han implementado tanto piletas como torres de enfriamiento.

1.1. Justificación

Ingenio Pantaleón se dedica al procesamiento de caña de azúcar para la producción de azúcar, mieles, alcoholes y energía eléctrica. Como empresa comprometida con el medio ambiente, Pantaleón se ha percatado de que la cantidad de agua que se toma de los ríos, en época de zafra, es demasiada. Además de ello, también son conscientes de que, en un futuro no muy lejano, entrarán en vigencia leyes de aguas que rijan el consumo de las mismas, por lo que en este momento consideran que es ideal tomar precauciones para evitar tener inconvenientes más adelante.

De esta cuenta surge la necesidad de diseñar e implementar un sistema que recircule el agua dentro de la fábrica, la cual se obtendrá a partir de los procesos que permiten recuperar condensados. Estos procesos son el de evaporación y la cristalización, a través de condensadores. A partir de ello, el agua recuperada será acondicionada en una pileta de enfriamiento, con lo cual se podrá retornarla hacia la toma que se hace de los ríos. El propósito es disminuir la demanda de agua actual, que es de 3 metros cúbicos por segundo, y llevarla hasta 0,65 metros cúbicos por segundo, para un mejor aprovechamiento del recurso hídrico.

1.2. Formulación y delimitación del problema

En época de zafra, en Ingenio Pantaleón se toma una cantidad demasiado grande de agua de los ríos aledaños a la fábrica, lo cual no permitirá cumplir con la iniciativa de ley de aguas 3702 cuando esta entre en vigencia.

1.3. Alcances o límites

Implementación de una pileta de enfriamiento que permita recircular el agua que se utiliza en los condensadores de Ingenio Pantaleón, hasta que el sistema de enfriamiento y recirculación se encuentre en funcionamiento y permita que el agua demandada de los ríos sea aproximadamente de 0,65 metros cúbicos por segundo.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Proceso del azúcar

El proceso industrial para la fabricación de azúcar requiere la aplicación de varios procesos con los cuales se busca convertir el jugo de caña en cristales y depurarlos a manera de eliminar cualquier impureza que resulte dañina. Básicamente, el proceso se lleva a cabo en las siguientes etapas: extracción de jugo, tratamiento de jugo y recuperación de azúcar.

2.1.1. Extracción de jugo

Esta parte del proceso corresponde al inicio de la producción de azúcar. Consiste, principalmente, en tomar la caña desde los campos de cultivo y pasarla por un proceso de molienda con el fin de extraer el jugo. Se subdivide en los procesos de preparación y molienda de caña, en dicho orden. Posteriormente, el jugo que se obtiene es llevado al proceso de tratamiento de jugo.

2.1.2. Tratamiento de jugo

Consiste en recibir el jugo que viene de la etapa de extracción y adecuarlo para la siguiente, con el fin primordial de eliminar las impurezas que pueda tener. Para lograrlo el jugo pasa por un proceso de clarificación, luego la evaporación para obtener meladura, la cual pasa finalmente a otra clarificación con la que culmina así esta etapa. Por último, sigue la etapa de recuperación de azúcar.

2.1.3. Recuperación de azúcar

Consiste en la producción de los cristales de azúcar a partir de la meladura proporcionada por la etapa de tratamiento de jugo. Se compone del proceso de cristalización, separación y dependiendo del tipo de azúcar que se desea obtener, se realiza un proceso de refinado del azúcar crudo. En esta misma etapa se agrega un proceso más al final que corresponde al de envasado del azúcar, ya como producto final, el cual puede ser empacado a granel o en sacos de distintas presentaciones.

2.2. Evaporación

Es una operación esencial en todas las fábricas de azúcar y es un factor que determina ampliamente la eficiencia energética. Tiene como fin incrementar la concentración del jugo clarificado hasta un contenido de sólidos disueltos (Brix) alrededor el 65 al 68%, lo cual la convierte en el principal consumidor de vapor. En este punto, el jugo, al salir de los evaporadores se llama meladura. La configuración de la estación de evaporación determina la cantidad de vapor que la fábrica requiere y, por lo tanto, el arreglo de los evaporadores es de gran importancia.

El uso de múltiples efectos de evaporación en serie hace posible reducir la demanda de vapor, por lo cual la mayor parte del agua es evaporada mediante el proceso. El máximo límite de concentración de la meladura se encuentra en las condiciones de saturación donde comienza la cristalización.

En teoría esto limitaría los sólidos disueltos hasta aproximadamente 72%, pero en la práctica se prefiere operar con un margen de seguridad de por lo menos dos unidades. Se deja un margen al control y se permite cierto

enfriamiento en caso de almacenamiento de meladura sin que ocurra cristalización.

2.3. Cristalización

La cristalización en las fábricas se produce bajo vacío e involucra procesos simultáneos de transferencia de masa y evaporación. El vacío es necesario para mantener la temperatura a un nivel suficientemente bajo que permita minimizar la formación de color y la inversión o degradación de sacarosa en el proceso.

Al iniciar un cocimiento discontinuo o *batch*, el licor se concentra hasta alcanzar la zona metaestable, punto en donde se sobresatura la meladura e inicia el crecimiento de cristales. La cristalización se inicia adicionando semillas muy finas en forma de suspensión o *slurry*, las cuales proporcionan sitios de nucleación para comenzar la cristalización. A partir de entonces, la concentración del licor madre se controla de manera que la cristalización ocurra sin disolver ningún cristal y sin formación de nuevos núcleos (falso grano). El material resultante contiene líquido (miel) y cristales (azúcar) y es denominado masa cocida. El trabajo de cristalización se lleva a cabo empleando el sistema de tres cocimientos o templeas para lograr la mayor concentración de sacarosa.

Para esto se requiere establecer suficiente área superficial de cristales y regular la alimentación del tacho para controlar la concentración del licor madre. Tradicionalmente, este proceso se ha efectuado empleando tachos discontinuos, pero también se han introducido sistemas continuos.

Más adelante se hablará sobre estos equipos. Sin embargo, la etapa inicial de cristalización se realiza aún de manera discontinua. En algunas ocasiones el

proceso comienza partiendo un magma o pie de templa; es decir, una mezcla de licor y cristales de un cocimiento previo, para evitar el proceso de semillamiento.

2.4. Evaporadores y tachos

En los incisos anteriores se describió la operación de evaporación y cristalización. Estas operaciones unitarias se realizan en equipos conocidos como evaporadores y tachos.

2.4.1. Evaporadores

Los evaporadores son intercambiadores de calor, los cuales utilizan como fuente de energía vapor latente, generalmente a una temperatura mayor a la temperatura de vaporización del agua o de la solución acuosa que se desea concentrar o diluir. Se pueden clasificar en función de la posición de la tubería o bien de los métodos que emplea para aplicar calor. Para propósitos de un ingenio azucarero, se estudiará los evaporadores de calandria o tipo Robert.

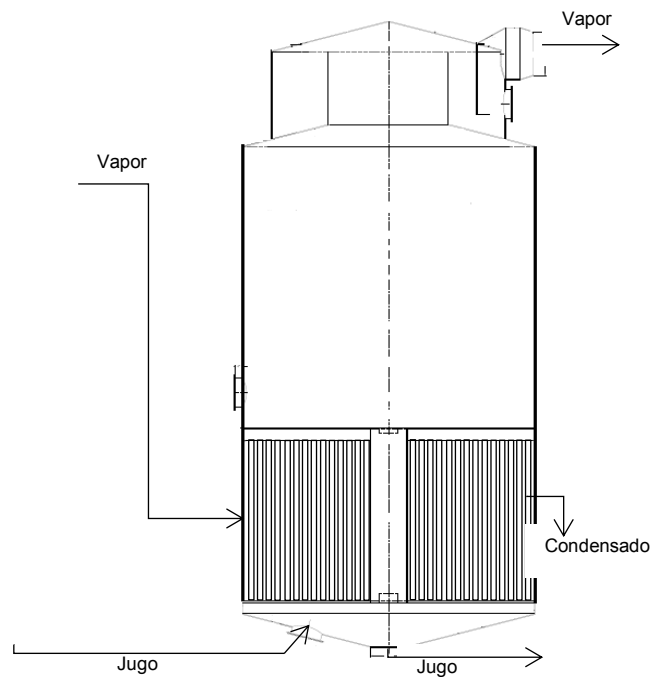
2.4.1.1. Evaporadores tipo Robert

Los evaporadores de calandria con tubos verticales fueron introducidos por primera vez alrededor de 1850 por Robert Rillieux, el director de una fábrica de azúcar en Seelowitz, Moravia. El diseño fue ampliamente adoptado y aún hoy son los evaporadores más utilizados. Por lo general cuentan con tubos de 38 a 51 milímetros de diámetro y longitudes de tubo en el rango de 1,5 a 3 metros. La mayoría de calandrias poseen un tubo bajante, normalmente en el centro del evaporador, para mejorar la circulación y la transferencia de calor, y que proporciona una conveniente ubicación para la salida del líquido concentrado. Se

debe tener el cuidado de distribuir uniformemente la alimentación de los cuerpos por debajo de la calandria.

La evaporación por descompresión instantánea *flash* del líquido que entra promueve la circulación y la transferencia de calor, y puede ser utilizada en beneficio del proceso.

Figura 1. **Esquema de evaporador tipo Robert**



Fuente: elaboración propia.

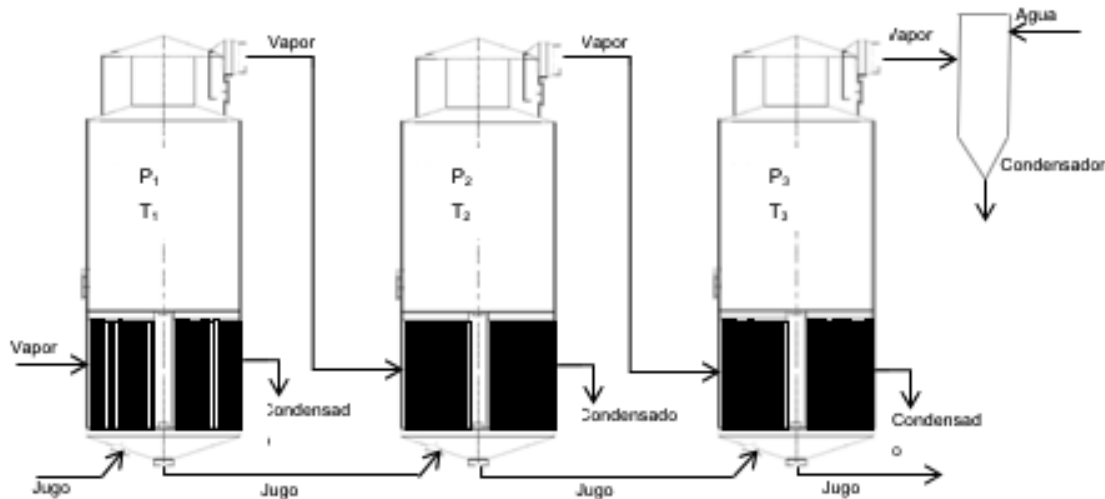
2.4.1.2. **Evaporación con múltiple efecto**

En un evaporador de efecto simple, la entalpía del vapor producido no es aprovechada, ya que este vapor no es utilizado como elemento o agente de calefacción. Sin embargo, sí puede usarse en un segundo evaporador si la disolución contenida en este último tiene un punto de ebullición suficientemente

bajo para que la diferencia de temperatura entre el vapor de calefacción y la disolución hirviente proporcione un flujo de calor adecuado.

Esta es la idea básica de los evaporadores de múltiple efecto, introducidos por Rillieux, en 1840.

Figura 2. Sistema evaporadores múltiple efecto



Fuente: elaboración propia.

El vapor producido en el primer efecto es utilizado para calentar el segundo, en el cual se condensa a una temperatura superior a la de ebullición de la disolución que se evapora en el mismo. El vapor producido en este segundo evaporador se lleva a un tercero en el que se condensa a una temperatura superior a la de ebullición de la disolución que se encuentra en el mismo; el vapor de agua producido en este último efecto se recoge en un condensador conectado, a su vez, con un sistema de vacío.

Si los evaporadores se numeran en el sentido en que disminuye la presión, y las presiones y las temperaturas en cada unidad son, respectivamente, P1, P2, y P3, y T1, T2, y T3, se cumple que: $P1 > P2 > P3$ y $T1 > T2 > T3$.

El estudio de un sistema de evaporación de efecto múltiple se puede realizar con base en las siguientes suposiciones:

- El sistema opera en condiciones de flujo y estado estacionarios. Las velocidades de flujo de masa son tales que en ningún evaporador hay acumulación o disminución de disolvente o soluto. Las concentraciones, las presiones y las temperaturas en cada evaporador se mantienen constantes.
- Las disoluciones no presentan elevación del punto de ebullición, y los efectos de la carga hidrostática son despreciables.
- La cantidad de calor necesaria para llevar la alimentación desde su temperatura inicial, TF, hasta la temperatura de ebullición, T1, también se considera despreciable, de tal forma que la cantidad de calor proporcionada por el vapor de calefacción en el primer efecto se encuentra como calor latente en el vapor que sale del mismo.
- Las entalpías de dilución no se toman en consideración.
- También se desprecia el calor que lleva el líquido, como consecuencia de estar a una temperatura por encima de la de ebullición, cuando pasa de un efecto a otro.

La economía de vapor lograda no se obtiene sin incurrir en costos adicionales. A medida que el número de efectos incrementa la diferencia de temperatura disponible, entre el vapor de escape y las condiciones del último efecto, debe ser compartida a lo largo de un mayor número de cuerpos evaporadores. Esto significa que el área de intercambio de calor deberá

incrementar, además de que un mayor número de efectos adiciona costos en términos de tubería, controles y complejidad.

2.4.2. Tachos

Los tachos o cristalizadores son equipos utilizados en la industria azucarera para la cocción de la meladura y las mieles provenientes de las centrífugas para obtener los granos de azúcar, proceso que se llama cristalización. Al igual que los evaporadores, los tachos se pueden clasificar según la disposición de los tubos o por el tipo de proceso que se tenga. Para propósitos de un ingenio azucarero, se estudiará los tachos de calandria.

2.4.2.1. Tachos de calandria (discontinuos)

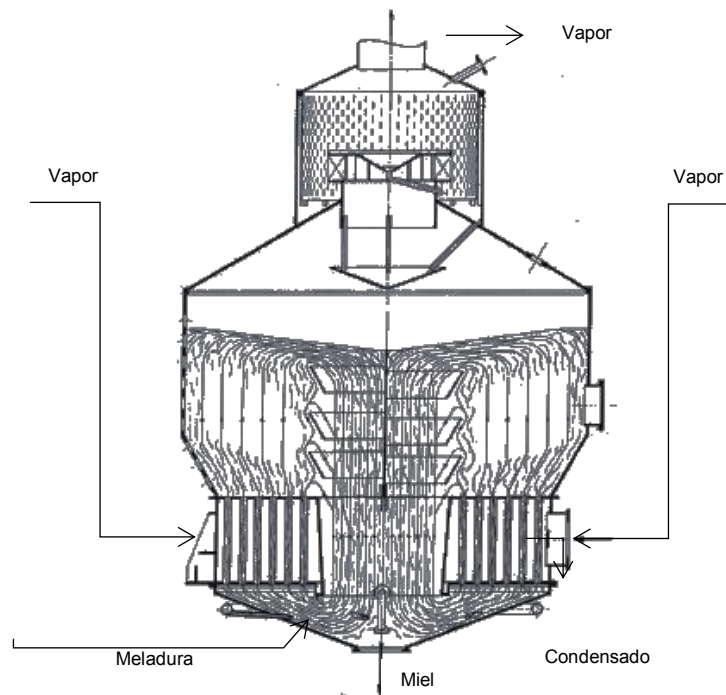
Un tacho de calandria es un evaporador de efecto simple, de diseño especial, dotado de tubos cortos de gran diámetro y un tubo central grande para facilitar la circulación de la masa cocida pesada y viscosa que se elabora en cochuras llamadas templeas.

El jarabe y las melazas, en ciertas proporciones, desarrollan cristales de azúcar. Se comienza por la cobertura de la superficie calórica a un nivel apenas suficiente para lograr que exista circulación, y se termina con la carga completa que constituye la templea, cuyo volumen es el triple del volumen con el que se comienza.

En cuanto a la alimentación se refiere, si el tacho está provisto de circulación mecánica, la alimentación tiene que llegar hasta la válvula de descarga o cerca de esta para que sea proyectada hacia el centro, debajo del impelente. Si el tacho

no tiene circulador, se debe poner cuidado especial en el logro de una distribución uniforme en el fondo, debajo de la calandria y lejos del tubo central.

Figura 3. **Esquema de tacho de calandria**



Fuente: REIN, Peter. *Ingeniería de la Caña de Azúcar*. p. 430.

2.5. Condensadores en la industria azucarera

Los condensadores y equipos de vacío se encuentran comúnmente en los evaporadores y tachos. Prácticamente todos estos equipos utilizan condensadores de contacto directo, donde el agua de enfriamiento o “inyección” entra en contacto directo con el vapor por ser condensado. En el sistema de vacío de la estación de filtros también se utiliza un condensador, pero que opera a un menor vacío (mayor presión absoluta). Las principales ventajas de la condensación por contacto directo son un bajo costo de construcción del condensador y la capacidad de alcanzar una muy cercana aproximación de

temperaturas; esto es particularmente importante porque las temperaturas de saturación del agua son relativamente bajas y la temperatura del agua de inyección es relativamente elevada en las regiones cálidas donde se cultiva caña.

Ambos factores tienen impacto sobre la demanda de agua de inyección. Los flujos de agua utilizados son bastante elevados.

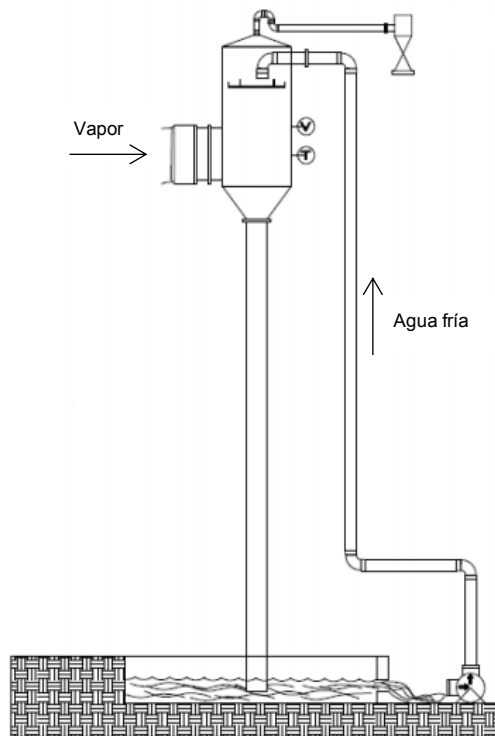
Como se mencionaba, los tachos y líneas de evaporación cuentan con un condensador propio. La presión absoluta en cada cuerpo es controlada regulando el flujo de agua de inyección al respectivo condensador. En algunos casos se utiliza un condensador común para todas las aplicaciones, pero esto es rara vez encontrado en las fábricas de azúcar.

El uso de un condensador común tiene la ventaja de que el sistema de agua de inyección es más simple, pero requiere tramos más largos de grandes tuberías de vapor desde cada cuerpo hasta el condensador y válvulas grandes de elevado costo para regular la presión absoluta en cada cuerpo. Esto también significa que el condensador opera a una presión absoluta más baja que la presión mínima para los tachos, requiriendo mayor cantidad de agua de inyección y retornándola al sistema de enfriamiento a una temperatura algo inferior.

Sin embargo, la principal desventaja es el hecho de que, incluso con un buen control, al arrancar o detener uno de los tachos discontinuos se induce inevitablemente algún grado de perturbación sobre el vacío de todos los demás equipos conectados al condensador común. Los dos requerimientos principales que debe tener un buen condensador son:

- Condensar todo el vapor con mínimo consumo de agua; es decir, la temperatura del agua que sale debe estar muy cerca de la temperatura de saturación del vapor.
- Enfriar los gases incondensables hasta una temperatura tan baja como sea posible, cercana a la temperatura del agua de inyección que entra, incluso cuando la tasa de evaporación sea baja.

Figura 4. **Esquema de condensador barométrico a contracorriente**



Fuente: W. H., Severns. *Energía mediante Vapor, Aire o Gas*. p. 319.

2.6. Sistemas de enfriamiento

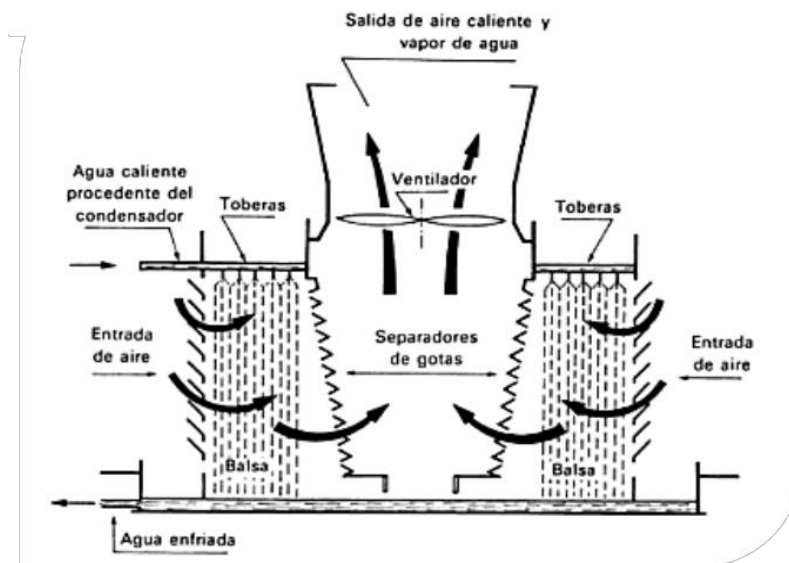
En los sistemas de enfriamiento de agua generalmente se utilizan piletas con boquillas atomizadoras o torres refrigerantes para lograr el enfriamiento requerido y expeler calor a la atmósfera. La temperatura con la cual el agua

retorna a los condensadores afecta la cantidad de agua que se debe bombear y la temperatura de los gases que salen hacia los equipos de vacío conectados al condensador. Generalmente, los gases incondensables se remueven del condensador empleando bombas de vacío o eyectores. A medida que el uso de vapor es más eficiente en una fábrica de azúcar, la cantidad de agua de inyección requerida disminuye, pues menos calor es desperdiciado, de aquí la importancia que tiene.

2.6.1. Torre de enfriamiento

Las torres de enfriamiento son equipos que se usan para enfriar agua en grandes volúmenes, y extraen el calor del agua mediante evaporación o conducción. El proceso es económico, comparado con otros equipos de enfriamiento como los cambiadores de calor, donde el enfriamiento ocurre a través de una pared.

Figura 5. Esquema de torre de refrigeración



Fuente: COSTA, José. *Curso Ingeniería Química: introducción a los procesos, las operaciones unitarias y los fenómenos de transporte*. p. 65.

2.6.2. Pileta de enfriamiento (*Spray Pond*)

Al igual que las torres de enfriamiento, las piletas de enfriamiento son equipos utilizados para enfriar el agua en grandes volúmenes, mediante la evaporación. Este sistema es igual o más efectivo. A diferencia de la torre de enfriamiento, el área requerida es el principal factor en un sistema de pileta de enfriamiento con boquillas tipo lluvia o *spray*.

Esta área depende hasta cierto punto del tipo de boquillas utilizadas y de la configuración del sistema. Es claro que el área requerida depende de más factores, incluyendo la temperatura del agua y las condiciones ambientales.

Idealmente, las boquillas tipo *spray* deben producir pequeñas gotas y montarse a la mayor altura posible para tener un máximo de tiempo de contacto entre las gotas de agua y el aire. Las boquillas deben, además, espaciarse suficientemente, de manera que el aire que entra en contacto con las gotas no se encuentre ya saturado o parcialmente saturado con vapor de agua. En la práctica, usualmente las boquillas se separan aceptando cierta reducción del desempeño con respecto a una sola boquilla aislada. Este efecto puede ser minimizado alineando los bancos de boquillas *spray* a un ángulo recto con la dirección prevaleciente del viento. Para minimizar las pérdidas por corrientes de aire se requiere de una separación alrededor de 8 metros entre las boquillas y los bordes de la pileta.

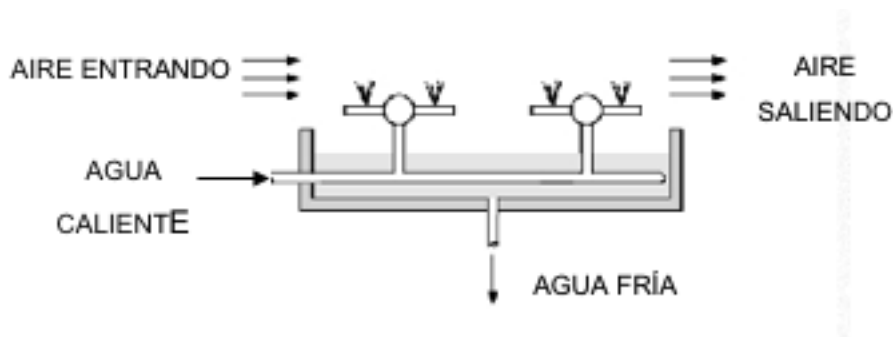
Además, las boquillas se deben seleccionar con aberturas que no sean tan pequeñas que resulten bloqueadas por los sólidos suspendidos. El diseño interno de este tipo de boquilla debe ser preferiblemente libre de aletas; el *spray* centrífugo, que utiliza fuerza centrífuga para dispersar el agua, es adecuado en esta tarea. Se deben montar aproximadamente a 2 metros por encima de la

superficie del líquido. El número de boquillas y el espacio entre ellas deben ser definidos considerando la información sobre el patrón de flujo esperado en función del flujo y la caída de presión.

La alimentación de agua a cada boquilla debe ser diseñada cuidadosamente. La caída de presión a través de las tuberías hasta cada boquilla debe ser mínima, para asegurar la misma presión a la entrada de cada boquilla y, por lo tanto, el mismo flujo a través de cada una de ellas.

La caída de presión a través de las boquillas *spray* está determinada por el tipo de boquilla utilizado. Esta puede estar típicamente en el rango de 30 a 60 kPa. Por otro lado, la profundidad de la pileta no es un factor importante en el diseño de los sistemas de enfriamiento. Una profundidad de 1 metro generalmente proporcionan los tanques de sello barométrico y las descargas. Las succiones de las bombas deben contar con cedazos o mallas coladoras adecuadas que sean fáciles de limpiar para prevenir el ingreso de cualquier material flotante.

Figura 6. **Esquema de pileta de enfriamiento**



Fuente: CENGEL, Yunes. *Termodinámica*. p. 13-16

2.7. Ventajas y desventajas de torre y pileta de enfriamiento

Al momento de elegir sobre el por qué se debe preferir un equipo por sobre otro es necesario tomar en cuenta los factores que generan ventajas y desventajas al compararlos, así se asegura tener el equipo que mejor se adecue a las necesidades de la operación.

Tabla I. **Ventajas y desventajas pileta de enfriamiento**

Ventajas	Desventajas
Tiene un menor costo de mantenimiento.	Alta expulsión de vapor de agua a la atmósfera. Es uno de los factores influyentes en el calentamiento global.
No siempre es necesario que el tiro sea inducido; es decir, el uso de ventiladores o motores.	Requiere mayor cantidad de agua porque necesita de grandes volúmenes para operar, lo cual produce un gran gasto natural.
Enfría grandes volúmenes de agua.	Requiere grandes áreas de terreno para su instalación.
Posee alta eficiencia.	Alto costo en la instalación inicial.

Fuente: elaboración propia.

Tabla II. **Ventajas y desventajas torre de enfriamiento**

Ventajas	Desventajas
Requiere áreas de terreno no tan extensas para su instalación.	Mayor probabilidad de fallos mecánicos o eléctricos.
Menores costos de bombeo.	Puede causar una cantidad mayor de empañamiento localizado y provocar la formación de hielo.
No es susceptible a vientos fuertes.	Altos costos de inversión.
Incrementa el rango de transferencia de calor del agua hacia el aire.	Requiere de purga para evitar la concentración de sólidos disueltos.

Fuente: elaboración propia.

2.8. Principios de transferencia de calor y masa en pileta de enfriamiento

La transferencia de calor es un proceso en el cual se intercambia energía en forma de calor entre distintos cuerpos, o entre diferentes partes de un mismo cuerpo que están a distinta temperatura. El calor se transfiere mediante convección, radiación o conducción. Aunque estos tres procesos pueden tener lugar simultáneamente, puede ocurrir que uno de los mecanismos predomine sobre los otros dos. El calor, como se mencionaba, puede transferirse de tres formas: por conducción, por convección y por radiación. La conducción es la transferencia de calor a través de un objeto sólido, la convección transfiere calor por el intercambio de moléculas frías y calientes y la radiación es la transferencia de calor por radiación electromagnética.

Por otro lado, la transferencia de masa cambia la composición de soluciones y mezclas mediante métodos que no implican necesariamente reacciones químicas. Se caracteriza por transferir una sustancia a través de otra u otras a escala molecular. Cuando se ponen en contacto dos fases que tienen diferente composición, la sustancia que se difunde abandona un lugar de una región de alta concentración y pasa a un lugar de baja concentración. El mecanismo de transferencia de masa depende de la dinámica del sistema en que se lleva a cabo. Hay dos modos de transferencia de masa:

- **Molecular:** la masa puede transferirse por medio del movimiento molecular fortuito en los fluidos (movimiento individual de las moléculas), debido a una diferencia de concentraciones. La difusión molecular puede ocurrir en sistemas de fluidos estancados o en fluidos que se están moviendo.

- Convectiva: la masa puede transferirse debido al movimiento global del fluido. Puede ocurrir que el movimiento se efectúe en régimen laminar o turbulento. El flujo turbulento resulta del movimiento de grandes grupos de moléculas y es influenciado por las características dinámicas del flujo.

Usualmente, ambos mecanismos actúan simultáneamente. Sin embargo, uno puede ser cuantitativamente dominante y, por lo tanto, para el análisis de un problema en particular, es necesario considerar solo a dicho mecanismo. La transferencia de masa en sólidos porosos, líquidos y gases sigue el mismo principio, descrito por la ley de Fick.

A partir de lo anteriormente mencionado, se hace referencia a que las piletas de enfriamiento rigen su función con base en los principios de la transferencia de calor y la transferencia de masa, pero dependiendo del punto de vista del fluido que se analiza. Si se analiza el agua que se enfría en la pileta a través de los aspersores, el mecanismo de transferencia de calor es quien predomina, mientras que, si se analiza el aire que se está saturando de humedad, es el de transferencia de masa.

Haciendo referencia a la transferencia de calor, el mecanismo que emplean las piletas de enfriamiento corresponde a una convección natural. La transferencia de calor por convección se debe al movimiento del fluido. El fluido frío adyacente a superficies calientes recibe calor que luego transfiere al resto del fluido frío mezclándose con él. La convección libre o natural ocurre cuando el movimiento del fluido no se complementa por agitación mecánica. En el caso del agua, al ser enfriada por la corriente de aire, es el contacto directo entre las moléculas frías de aire y las moléculas calientes de agua lo que genera el diferencial de temperatura y provoca la transferencia de calor desde el fluido más caliente hacia el más frío.

Sin embargo, si se enfoca desde el punto de vista del aire que enfría al agua, el mecanismo que se emplea es el de transferencia de masa, ya que aquí este, al estar en una menor concentración de humedad, absorbe en pequeña cantidad la humedad que se libera por parte del agua en forma de energía. La transferencia es de la región de mayor concentración (agua) hacia la de menor concentración (aire). La acción de ambos mecanismos simultáneamente corresponde al fenómeno de la evaporación.

2.9. Bombas centrífugas

Las bombas centrífugas también llamadas rotodinámicas, son siempre rotativas. Son un tipo de bomba hidráulica que transforma la energía mecánica de un impulsor. Una bomba centrífuga es una máquina que consiste en un conjunto de paletas rotatorias encerradas dentro de una caja o cárter, o una cubierta o coraza. Se denominan así porque la cota de presión que crean es ampliamente atribuible a la acción centrífuga. Las paletas imparten energía al fluido por la fuerza de esta misma acción. Es aquella máquina que incrementa la energía de velocidad del fluido mediante un elemento rotante, aprovechando la acción de la fuerza centrífuga, y la transforma en energía potencial a consecuencia del cambio de sección transversal por donde circula el fluido en la parte estática, la cual tiene forma de voluta y/o difusor.

2.9.1. Cabeza neta de succión positiva

Se refiere a la presión estática a la que debe ser sometido un líquido, para que pueda fluir por sí mismo a través de las tuberías de succión y llegar a inundar los alabes en el orificio de entrada del impulsor de una bomba.

La presión en cualquier punto del sistema de bombeo deberá ser mayor a la presión de vapor del líquido bombeado, para evitar el fenómeno de cavitación en la tubería de succión o en los alabes del impulsor de la bomba.

Por ello, en la práctica se calculan dos cabezas netas de succión positiva: la requerida, que es proporcionada por el fabricante, y la disponible. El NPSH (requerido) es un parámetro de la bomba y lo debe dar el fabricante. Se puede interpretar como la succión que produce la bomba para poder manejar el caudal y la cabeza para las cuales fue seleccionada. El fabricante define las limitaciones de succión de una bomba mediante la curva del NPSH requerido por la misma, para varios valores de caudal.

El NPSH(disponible) es un parámetro del sistema y debe calcularse. Nos dice qué tanta succión se puede tolerar antes que la presión alcance el valor de P_{sat} . De ahí el requerimiento.

$$\text{NPSH (requerido)} < \text{NPSH (disponible)}$$

El NPSH (disponible) es la presión abastecida por el sistema hidráulico externo a la bomba y depende exclusivamente de las características hidráulicas de la red externa de succión conectada a la bomba. Para que la instalación opere satisfactoriamente, sin fallas hidráulicas ni mecánicas, el NPSH (disponible) en el sistema deberá ser mayor por lo menos en 0,50 metros al NPSH (requerido) por la bomba.

2.9.2. Carga estática

Es la distancia vertical en unidades de longitud, desde el nivel de suministro del fluido hasta el eje central de la bomba y del nivel de la bomba hasta el nivel de descarga de la misma. Cuando la bomba se encuentra arriba del nivel de suministro se llama cabezal estático de elevación, y cuando la bomba está por debajo de dicho nivel, se habla de cabezal estático de succión.

2.9.3. Carga dinámica

Se refiere a la longitud equivalente que se tiene, producto de las pérdidas por fricción que genera el fluido en la tubería y por los accesorios del sistema que se emplea.

2.9.4. Potencia

Cuando se refiere a la potencia de una bomba, no se habla específicamente de la bomba, sino más bien del motor que esta empleará para trabajar de acuerdo a los requerimientos para los que se utilizará. La potencia de la bomba dependerá en gran medida del caudal que se emplee y de la distancia que el fluido por utilizar tenga que desplazarse. Así, se define la potencia de una bomba como la energía consumida por la máquina en la unidad de tiempo establecida.

2.10. Tratamiento de agua en pileta de enfriamiento

El tratamiento de aguas es de suma importancia para evitar problemas en un futuro cercano o lejano para cualquier sistema de circulación de aguas.

Por ello es importante tener en cuenta ciertos parámetros que podrían afectar dicho sistema.

2.10.1. Crecimiento microbiano

Es uno de los problemas más frecuentes. El agua a temperaturas próximas a 35°C, altas concentraciones de O₂, luz UV, constituyen un microclima adecuado para crecimiento de microorganismos como son algas, bacterias y hongos. Uno de los efectos que se producen es la obstrucción de tuberías, relleno, etc., lo cual disminuye la eficiencia del sistema. Otros microorganismos favorecen la corrosión, al absorber o desprender O₂ favorecen reacciones catódicas; es decir, que generan H₂ y forman depósitos, lo cual favorece la aireación diferencial.

Para el tratamiento de este problema no es viable un control mecánico de los microorganismos que se pudieran desarrollar, por lo que se impone un tratamiento químico de los mismos. Agentes desinfectantes como cloro, bromo o dióxido de cloro son algunas de las soluciones, pero en sí, la dosificación de biocidas específicos para cada tipo de microorganismo es la solución correcta, teniendo cuidado de que la concentración del biocida sea la adecuada.

2.10.2. Incrustaciones

El agua utilizada para enfriamiento es de origen natural. Se verá sometida a calentamiento, aun cuando sea mucho menor al que se da en un generador de vapor. Por lo tanto, encontraremos formación de incrustaciones, principalmente CaCO₃, Mg(OH)₂ y CaSO₄.

Es posible estudiar las características particulares del agua que circula por el sistema para determinar su tendencia a precipitar o disolver depósitos cálcicos. Por ello, se emplea los índices desarrollados por Langelier, Ryznar y Puckorius.

El índice de saturación de Langelier da una idea cualitativa de cuán estable es el agua considerada con relación a la precipitación de CaCO_3 . Un índice de saturación de Langelier positivo denota la tendencia del agua a precipitar carbonato de calcio, mientras que si es negativo, indica que el agua tiene tendencia a disolver las incrustaciones. El índice de estabilidad de Ryznar, de acuerdo con el valor obtenido, indica a través de una escala la tendencia incrustante o corrosiva del agua, como se muestra a continuación:

Tabla III. **Índices de estabilidad de Ryznar**

I.E.R	Condición
3,0	Extremadamente incrustante
5,0	Severamente incrustante
5,5	Moderadamente incrustante
5,8	Levemente incrustante
6,0	Estable
6,5	Estable con leve tendencia corrosiva
7,0	Levemente corrosiva
8,0	Moderadamente corrosiva
9,0	Fuertemente corrosiva

Fuente: GUISLIERI, Daniel. *Tratamiento de agua de Sistemas de Enfriamiento*. p. 7.

De esta forma, y a partir de los índices determinados, es importante tomar algunas consideraciones con relación con posibles depósitos en los sistemas de enfriamiento; las precauciones son las siguientes:

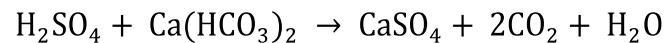
- Total sólidos disueltos < 2 500 mg/L
- $[\text{Ca}^{++}]_{\text{CaCO}_3} < 300$
- $[\text{Ca}^{++}]_{\text{CaCO}_3} * [\text{SO}_4]_{\text{CaCO}_3} < 500,000$

- [SiO₂] < 120 mg/L

También es posible utilizar sistemas de tratamiento que modifiquen algunas de las sustancias presentes o sus características, para poder trabajar en condiciones más seguras. Estos sistemas pueden agruparse en dos categorías:

2.10.2.1. Tratamiento ácido

El agregado de ácido sulfúrico reduce la alcalinidad presente en el agua según:



Esto disminuye la probabilidad de formación de CaCO₃, pero es un tratamiento peligroso por agregar ácido al sistema, ya que requiere de un buen control.

2.10.2.2. Tratamiento alcalino

Otra opción es mantener el pH del circuito en valores alcalinos y agregar productos que logren mantener el calcio en solución. Estos pueden ser fosfonatos o poliacrilatos, o bien que modifiquen la estructura cristalina de los precipitados de calcio para que formen lodos que puedan ser removidos por purga. En este caso pueden ser polifosfatos, polímeros de bajo peso molecular (menores a 100,000).

2.10.3. Corrosión

Los sistemas de enfriamiento contienen diversos materiales metálicos como aceros, acero galvanizado, aleaciones de cobre, etc. A esto, debe agregarse los productos utilizados para controlar las incrustaciones o crecimiento microbiano, que estarán disueltos en el agua del circuito. Es un medio muy complejo.

Al estar el agua del sistema en permanente contacto con el aire, estamos seguros de que, en cada recirculación, la concentración de oxígeno disuelto en la misma será muy cercana a la de saturación de oxígeno disuelto en esas condiciones. Este problema es grave pues la corrosión se dará en los equipos más caros de forma localizada. Todo lo anterior hace que se requiera de una cuidadosa evaluación al elegir un sistema de control de la corrosión.

Una posible solución es modificar las características agresivas del agua. El control de la concentración de oxígeno disuelto, por ejemplo, por agregado de sulfito, sería excesivamente caro a la vez que ineficiente. Es frecuente el uso de inhibidores de corrosión, los que actúan protegiendo la superficie del material metálico, cuya acción es la de despolarizar las reacciones de corrosión. Existen inhibidores anódicos y catódicos, dependiendo sobre cuál reacción actúan. En general, los catódicos precipitan sobre el metal formando una barrera protectora al ataque del oxígeno. Los anódicos promueven la formación de óxidos estables del metal, lo que limita la disolución del mismo. Los inhibidores más comunes son:

- Anódicos: molibdatos, ortofosfatos, nitritos, silicatos.
- Catódicos: zinc, polifosfatos, fosfonatos.

2.11. Situación actual del agua en Guatemala

El agua (del latín *aqua*) es un compuesto químico formado aproximadamente por dos partes de hidrógeno y 16 partes de oxígeno (H₂O). Existe en estado líquido, sólido (hielo) y gaseoso (vapor). Cubre el 71 % de la superficie terrestre, localizada principalmente en los océanos donde se concentra el 96,5 % del agua total; los glaciares y casquetes polares tienen el 1,74 %; los depósitos subterráneos (acuíferos), los permafrost y los glaciares continentales suponen el 1,72 %, y el restante 0,04 % se reparte en orden decreciente entre lagos, humedad del suelo, atmósfera, embalses, ríos y seres vivos.

El agua es el líquido fundamental e imprescindible para la vida en la Tierra, para el desarrollo de plantas y animales, principalmente la supervivencia del ser humano y, por ende, para que pueda desarrollar sus actividades. Guatemala es un país privilegiado respecto a la disponibilidad y oferta del recurso hídrico, gracias a sus características geográficas, geológicas y orográficas.

El país se divide en tres vertientes de escurrimiento superficial: Pacífico, Atlántico o Caribe y Golfo de México, esta última posee la mayor extensión y el mayor caudal promedio (1 672 m³/seg). Se estima que la oferta bruta total (millones de m³) de las tres vertientes para 2005 fue de 93 388,49, y tomando en cuenta el caudal ecológico y la reducción por contaminación el caudal neto disponible fue de 32 686. Para ese mismo año, el consumo anual fue de 7 652 millones de m³, cuando se produjo un excedente de 25 034 millones de m³.

En ese sentido, el balance hídrico evidencia, en términos generales, que el país está lejos de afrontar problemas de escasez del vital líquido; sin embargo, muchos guatemaltecos no disponen del recurso en términos de potabilidad y saneamiento. Por tanto, se deduce que Guatemala no cuenta con políticas o

medidas que garanticen una administración adecuada del agua, en función de las necesidades de la población.

Los principales usos del recurso hídrico en este país son: demanda para riego, demanda industrial, uso doméstico y otros, entre los que destacan la generación hidroeléctrica. Además, el agua es el medio básico para desarrollar actividades pesqueras, de turismo, transporte y, en algunos casos, para conservar la biodiversidad y los recursos naturales.

Los mayores impactos sobre este recurso provienen de la sobreutilización del líquido subterráneo, especialmente a causa de la urbanización; la contaminación, por su parte, representa el problema más generalizado en el país. Según estudios, en el año 2000 se registraban 49 plantas de tratamiento de aguas residuales a nivel nacional, de las cuales únicamente 15 funcionaban de manera correcta.

Del total de plantas, 23 se ubicaban en el área metropolitana. De los 223 centros urbanos que cuentan con sistemas de drenaje, solo 24 aplican algún tipo de tratamiento y el resto desemboca en cuerpos de agua cercanos. Por otra parte, estos cuerpos de agua también son contaminados por residuos de sistemas agropecuarios y por desechos industriales que suelen ser tóxicos. De ello se deriva un elevado número de efectos negativos sobre la salud humana, causantes de morbilidad. Las enfermedades más incidentes son de tipo diarreico, agravadas por un sistema nacional de salud deficiente.

2.12. Leyes de agua en Guatemala

De acuerdo con el Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales, al menos el 40 % de los recursos hídricos del país presentan algún grado de contaminación, por lo cual se destacó recientemente la necesidad de aprobar una ley en dicha materia. Sin embargo, el tema nunca ha avanzado en el Congreso por diversas razones, pese a que el país ha intentado aprobar una legislación durante los últimos 50 años.

La última vez que se discutió una propuesta al respecto fue en 2008, cuando la “Ley para el Aprovechamiento y manejo Sostenible de los Recursos Hídricos” la iniciativa 3702, recibió dictamen favorable en el congreso. Con tragedias como la contaminación del río La Pasión en Petén, en la que murieron miles de peces y decenas de familias se quedaron sin su sustento diario, se hizo cada vez más evidente la necesidad de aprobar una legislación en la materia. En ese entonces, el representante de la Oficina del Alto Comisionado de las Naciones Unidas para los Derechos Humanos en Guatemala, pidió al Congreso la aprobación de una normativa para regular el uso de los afluentes hídricos en el país.

El ingeniero guatemalteco Abraham Barrios es quien se ha dedicado a revisar y desarrollar la iniciativa 3702. El proyecto de ley propone la creación de la figura legal de las Autoridades de Cuenca, que serían las encargadas de ejecutar una política de Estado para administrar los recursos hídricos.

La iniciativa 3702 divide al país en doce regiones hidrográficas, que son áreas territoriales conformadas en función de sus características morfológicas, orográficas e hidrológicas. Normalmente una región hidrográfica está integrada por dos o varias cuencas hidrográficas.

El proyecto plantea que cada región tendrá una Autoridad de Cuenca, que se encargará de cumplir y hacer que se cumpla la ley y toda la legislación ambiental. Según la iniciativa, cada Autoridad de Cuenca será el ente técnico-científico de apoyo al Consejo Nacional de Aguas sobre temas relacionados a los recursos hídricos dentro de su jurisdicción. Algunos de los beneficios que se obtendrían al implementar la Ley de Aguas serían:

- Ley de rango constitucional garantizaría la protección transgeneracional de las cuencas y recursos naturales.
- Proveería el andamiaje técnico-jurídico para la protección, gestión y manejo de los recursos hídricos.
- Proveería un marco de referencia para toda legislación ambiental y política de estado relacionada al ambiente.
- Proveería la línea base necesaria para diseñar políticas de mitigación del impacto del cambio climático.
- Proveería las herramientas para completar estudios de zonas de riesgo, ordenamiento territorial, catastros ambientales, inventarios de recursos.

La iniciativa 3702 propone:

- Divide al país en 12 regiones hidrográficas.
- Identifica, define y registra los recursos hídricos.
- Regula la gestión, administración y manejo de los recursos hídricos.
- Regula la calidad del agua para consumo humano.
- Establece estándares y parámetros para el diseño y construcción de plantas y sistemas de tratamientos de aguas.
- Establece las bases legales y técnicas para la estandarización de los servicios de agua potable.

- Regula toda actividad humana que tenga el potencial de impactar negativamente las cuencas.
- Regula las servidumbres, licencias y permisos asociados al aprovechamiento de los recursos hídricos.
- Constituye una guía técnica y un recurso valioso para la toma de decisiones a todos los niveles.
- Propone mejorar la eficiencia gubernamental con la transferencia de entidades de otros ministerios al Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales, como el Insivumeh, el INAB, la Conred, etc. y su incorporación al sistema de autoridades de cuencas.
- Se crearían por lo menos 600 empleos nuevos entre técnicos y profesionales, aproximadamente 50 personas por cada región hidrográfica.

3. MARCO METODOLÓGICO

3.1. Variables

A continuación, se muestra las variables que se manejarán en la ejecución del proyecto de recirculación de aguas.

Tabla IV. Variables de manejo de proyecto

Variable	Unidad	Dependiente	Independiente	Constante	No Constante
Caudal de condensadores	gal/min		X		X
Presión de succión en bombas	psi		X		X
Presión de descarga en bombas	psi		X		X
Temperatura de entrada del agua en pileta	°F		X	X	
Temperatura de salida de agua en pileta	°F	X		X	
Caudal de entrada en toma de ríos	gal/min	X			X

Fuente: elaboración propia.

3.2. Delimitación del campo de estudio

- Campo: implementación y evaluación.
- Área: evaporación, tratamiento de jugo, fábrica.

- Proyecto: Diseño e implementación de una pileta de enfriamiento para un sistema de recirculación de aguas provenientes de los condensadores de evaporadores y tachos de un ingenio azucarero.
- Ubicación: fábrica del Ingenio Pantaleón, ubicado en el km 86,5 Siquinalá, Escuintla, Guatemala.

3.3. Recursos humanos disponibles

- Investigador: Luis Pedro Ericastilla Recinos
- Asesor: Ing. Pablo Fabián Escobar Grajeda
- Revisor: Ing. Sergio Alejandro Recinos
- Albañiles, soldadores, obreros y supervisores.

3.4. Recursos materiales disponibles

Para la realización del proyecto descrito anteriormente, se cuenta con los siguientes recursos:

3.4.1. Materia prima

- Agua de condensadores
- Agua de río

3.4.2. Equipo

- Bombas centrífugas modelo 600GS50 (6)
- Bombas de relleno modelo 350S-16(3)
- Aspersores de 5 boquillas (130 sets)
- Transmisores de nivel

- Transmisores de temperatura
- Transmisores de flujo
- Transmisores de presión
- Válvulas de mariposa
- Válvulas de cheque
- Transformador de 13,8 KW a 440 V
- Desarenador
- Tanque recolector de condensados
- Condensadores barométricos

3.4.3. Maquinaria

- Retroexcavadora
- Grúa
- Montacargas
- Cargador frontal
- Motoniveladora
- Cilindro compactador
- Compactador pata de cabra
- Minicargador con martillo

3.4.4. Infraestructura

- Instalación subterránea de 240 metros de tubería de hierro negro de 76” de diámetro.
- Instalación subterránea de 605 metros de tubería de hierro negro de 65” de diámetro.
- Base de concreto de 68 x 168 metros para pileta de enfriamiento.

- Instalación de ramales en pileta de 36, 30, 24, 18 y 12”.
- Instalación de 130 sets de aspersores de 5 boquillas.
- Base de concreto de 4 x 2 x 0,2 metros para instalación de bombas centrífugas modelo 600GS50.
- Instalación aérea de 9,90 metros de tubería de hierro negro para canal de condensados de tachos.

3.5. Técnica cualitativa/cuantitativa

Para poder determinar la eficiencia del sistema de enfriamiento de aguas de los condensadores de los evaporadores y tachos se medirá la temperatura en la tubería de entrada y se comparará con la temperatura en la tubería de salida de la pileta de enfriamiento.

Así mismo, para determinar la viabilidad del sistema de recirculación de aguas, se realizarán mediciones de caudal en la tubería que conecta la toma de agua de los ríos y en la tubería proveniente de la pileta de enfriamiento implementada.

3.6. Recolección y ordenamiento de la información

Para obtener y presentar la información se siguieron ciertos pasos, los cuales se presentan a continuación.

3.6.1. Información primera fase

- Realizar recorrido del agua en el ingenio.
- Determinar los equipos involucrados en el proyecto.
- Obtener área de transferencia de calor de evaporadores y tachos.

- Obtener datos de temperaturas de agua proveniente de condensadores de evaporadores y tachos de zafras anteriores.
- Obtener caudales de agua proveniente de condensadores de evaporadores y tachos de zafras anteriores.
- Obtener del área de obra civil, datos de mediciones de niveles de suelos.
- Obtener temperatura de bulbo húmedo en área de pileta de enfriamiento.

3.6.2. Información segunda fase

Ahora bien, para la parte experimental del proyecto que se realizará, la cual corresponde a la segunda fase, se contará con transmisores de temperatura tanto a la entrada como en la salida de la pileta de enfriamiento.

Además, se colocará un transmisor de presión en los ramales de la pileta de enfriamiento, así como un transmisor de caudal posicionado en la salida de la misma. De esta forma, se podrán realizar las mediciones necesarias para evaluar la eficiencia del sistema por implementar. Dicha información se obtendrá del programa que se emplea en el Ingenio para llevar el control y recopilar la información del proceso.

3.7. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información

A continuación, se presentan los datos obtenidos durante la elaboración del presente trabajo de graduación.

3.7.1. Datos primera fase

A continuación se presentan los datos correspondientes a la primera fase.

Tabla V. **Datos operativos de condensadores obtenidos de zafras anteriores**

Caudal total de 27 condensadores	65 000 gal/min (14 763 m ³ /h)
Temperatura entrada de agua	115°F (46°C)

Fuente: elaboración propia.

Tabla VI. **Área de transferencia de calor de evaporadores último efecto**

Vaso	Área (m ²)
E1	15 872,90
E2	18 642,55
E3	12 730,08
E4	15 503,76

Fuente: elaboración propia.

Tabla VII. **Datos para pileta de enfriamiento**

Temperatura salida de agua	90°F (32°C)
Temperatura de bulbo húmedo	80°F (26,85°C)
Presión requerida a la entrada	35,55 psi

Fuente: elaboración propia.

Tabla VIII. **Datos de niveles de suelo**

Nivel toma de condensados	99 msnm
Nivel succión de bomba	100 msnm
Nivel de tubería	95 msnm
Nivel de pileta de enfriamiento	116 msnm

Fuente: elaboración propia.

3.7.2. Datos segunda fase

A continuación se presentan los datos correspondientes a la segunda fase.

Tabla IX. Datos obtenidos PI DATA LINK

Día de zafra	Temperatura entrada a enfriador (°F)	Temperatura salida de enfriador (°F)	Presión agua entrada a enfriador (psig)	Presión agua sprays enfriador (psig)	Flujo de agua de río a Ingenio (m ³ /s)
18	111,720	86,505	28,978	26,977	1,181
	104,284	83,262	27,321	25,336	1,026
	113,990	88,420	27,109	25,125	0,996
	117,680	91,417	26,981	24,988	0,994
	115,829	90,059	27,605	25,624	1,050
	113,484	88,871	28,297	26,322	1,091
19	112,217	86,596	28,489	26,514	1,100
	110,659	85,159	26,983	25,034	1,081
	111,342	87,239	26,842	24,886	1,320
	114,674	89,596	26,580	24,620	1,413
	114,578	88,771	26,488	24,543	1,426
	112,351	87,140	26,896	24,949	1,417
20	110,111	85,380	26,909	24,963	1,414
	109,661	84,957	25,750	23,814	1,383
	109,228	88,217	24,545	22,588	1,252
	108,836	89,161	23,341	21,379	1,221
	108,315	88,234	24,839	22,877	1,218
	105,624	86,957	26,642	24,676	1,245
21	104,319	85,502	25,779	23,823	1,228
	104,837	84,828	24,979	23,030	1,232
	116,946	89,714	27,070	25,109	1,198
	117,619	91,600	26,852	24,892	1,210
	116,828	89,793	26,248	25,264	1,596
	115,132	88,006	27,371	25,380	1,436

Continuación tabla IX.

Día de zafra	Temperatura entrada a enfriador (°F)	Temperatura salida de enfriador (°F)	Presión agua entrada a enfriador (psig)	Presión agua sprays enfriador (psig)	Flujo de agua de río a Ingenio (m ³ /s)
66	110,315	85,426	28,092	26,357	0,686
	111,500	85,549	29,005	27,268	0,716
	113,332	86,608	29,083	27,347	0,891
	116,812	88,451	30,991	29,264	0,820
	116,396	88,188	29,313	27,610	0,774
	115,756	87,113	29,239	27,549	0,852
67	113,554	86,783	27,776	26,095	0,638
	105,176	83,957	24,470	22,795	0,678
	112,822	86,769	28,983	27,340	0,829
	117,063	89,311	27,609	25,968	0,724
	116,934	89,498	28,232	26,613	0,733
	115,271	87,777	28,162	26,562	0,735
68	114,574	86,255	27,383	25,803	0,732
	114,844	85,455	26,439	24,884	0,774
	117,283	88,635	28,788	27,267	0,739
	116,728	89,528	29,493	27,972	0,691
	115,194	88,894	29,804	28,301	0,704
	114,612	87,554	29,873	28,385	0,713
69	111,056	82,702	29,300	27,834	0,722
	107,181	79,343	28,756	27,299	0,796
	111,531	84,840	29,534	27,760	0,756
	115,351	88,394	30,084	28,206	0,748
	115,068	87,693	31,794	30,000	0,762
	110,404	84,429	36,313	34,620	0,797
70	105,227	81,133	39,188	37,536	0,811
	102,301	79,182	40,551	38,903	0,820
	105,285	83,592	41,474	39,861	0,816
	110,715	87,243	39,930	38,283	0,791
	112,496	87,634	37,327	35,803	0,795
	110,035	85,653	38,024	36,492	0,813

Fuente: elaboración propia empleando *PI DATA LINK*.

3.8. Análisis estadístico

A continuación, se presentan las ecuaciones utilizadas para los cálculos efectuadas en el trabajo de graduación.

3.8.1. Media aritmética

Es utilizada para encontrar el valor promedio entre las mediciones, que corresponde a la suma de todas las mediciones dividida por el número o cantidad de mediciones.

$$\bar{X} = \frac{\sum X_i}{N} \quad \text{[Ecuación 1]}$$

3.8.2. Desviación estándar

Es una medida de dispersión para variables de razón (variables cuantitativas) y de intervalo. Se define como la raíz cuadrada de la varianza de la variable.

$$S = \sqrt{\sum_i \frac{(x_i - \bar{X})^2}{n-1}} \quad \text{[Ecuación 2]}$$

3.8.3. Coeficiente de variabilidad

Es una medida de dispersión que describe la cantidad de variabilidad en relación con la media.

$$CV = S / \bar{X} \quad \text{[Ecuación 3]}$$

4. RESULTADOS

Se presentan a continuación los resultados obtenidos.

4.1. Etapa de diseño

A continuación se presentan los resultados de la etapa de diseño.

Tabla X. **Parámetros de diseño de bomba centrífuga**

Altura en línea de succión (m)	1,760
Altura en línea de descarga (m)	19,000
Cabeza total (m)	17,310
Factor de seguridad (25%)	1,250
Cabeza total requerida (m)	21,640
NPSHd (m)	10,930
NPSHr (según fabricante) (m)	7,000
Potencia de motor (kW)	171,827
Eficiencia	0,800
Potencia hidráulica (kW)	214,783

Fuente: elaboración propia.

Tabla XI. **Parámetros de diseño de pileta de enfriamiento**

Área pileta de enfriamiento (m ²)	15 141,650
Caudal (gal/min)	65 000
Temperatura agua entrada (°F)	115,000
Temperatura agua salida (°F)	90,000
Temperatura bulbo húmedo (°F)	80,000
Eficiencia	73,110
Pérdidas por evaporación (gal/min)	1 071,000
Pérdidas por arrastre (gal/min)	113,750
Calor total disipado (MW)	169,740

Fuente: elaboración propia.

Tabla XII. **Análisis financiero**

Tasa interna de retorno	90%
Costo total proyecto (\$)	3 780 077,00

Fuente: elaboración propia.

4.2. Etapa de implementación

A continuación se presentan los resultados de la etapa de implementación.

Tabla XIII. **Promedio aritmético, desviación estándar y coeficiente de variación de las variables del proyecto**

	Temperatura entrada a enfriador (°F)	Temperatura salida a enfriador (°F)	Presión agua entrada a enfriador (psig)	Presión agua <i>sprays</i> enfriador (psig)	Flujo de agua río a ingenio (m ³ /s)
Promedio	112,19	86,46	28,4	26,95	0,97
Desviación estándar	11,67	8,81	4,56	4,35	0,22
Coeficiente de variabilidad (%)	10,40	10,19	16,06	16,16	22,25

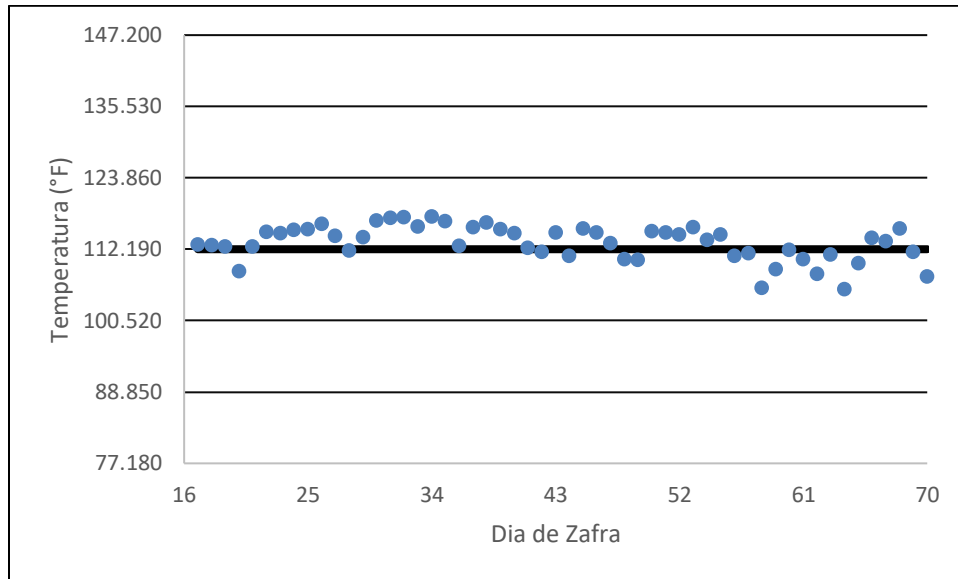
Fuente: elaboración propia.

Tabla XIV. **Eficiencia real piletta de enfriamiento**

Temperatura agua entrada (°F)	112,19
Temperatura agua salida (°F)	86,46
TBH aire para enfriamiento(°F)	80,33
Eficiencia	80,76

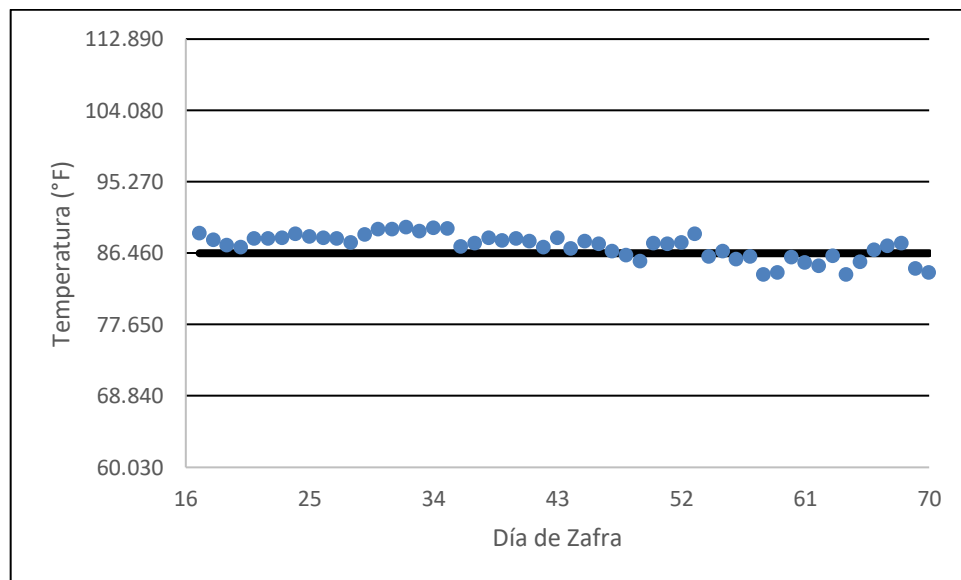
Fuente: elaboración propia.

Figura 7. **Gráfico de control temperatura agua entrada a enfriador**



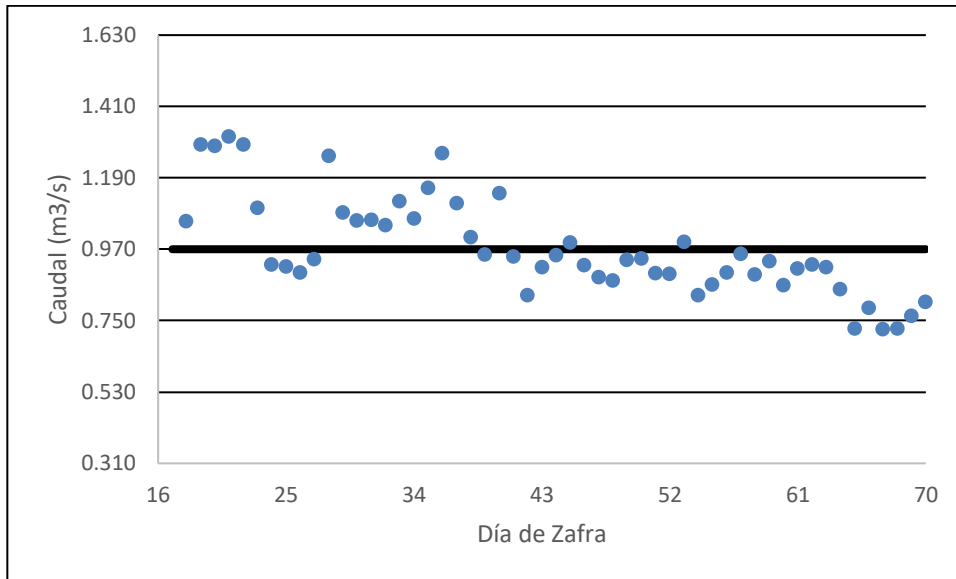
Fuente: elaboración propia.

Figura 8. **Gráfico de control temperatura agua salida de enfriador**



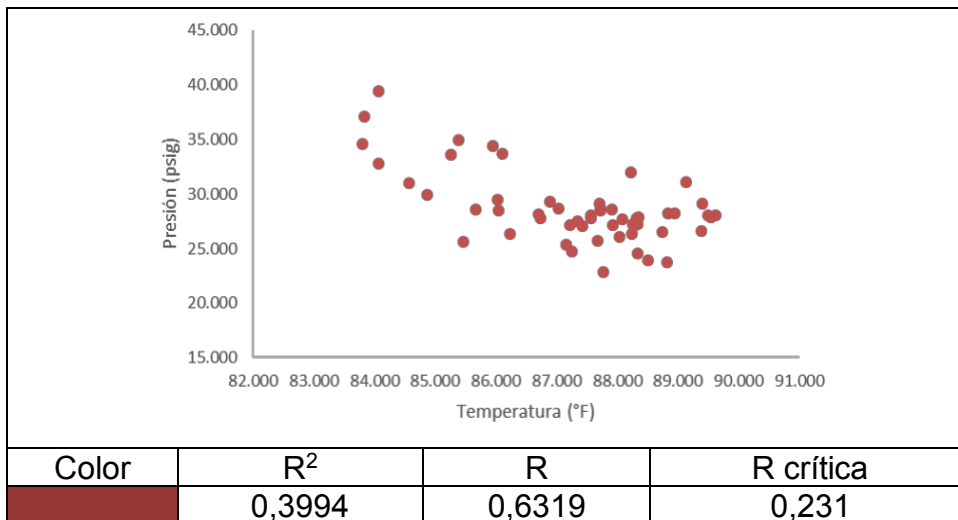
Fuente: elaboración propia.

Figura 9. **Gráfico de control flujo de agua de río a ingenio**



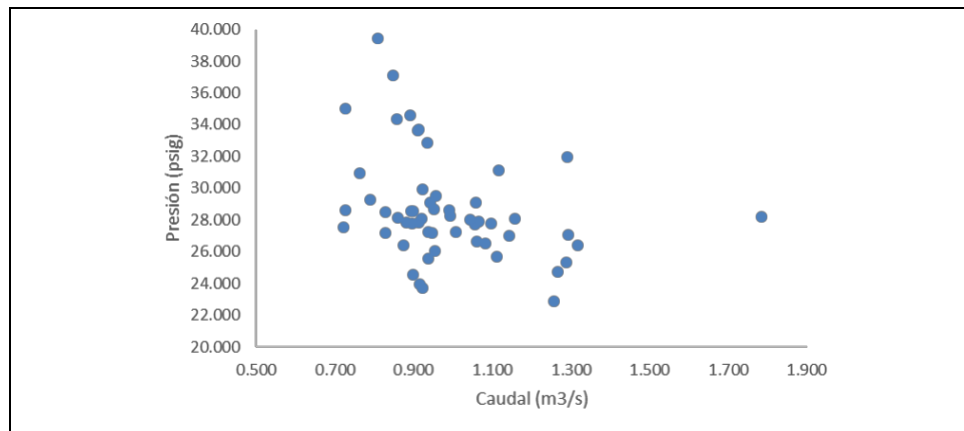
Fuente: elaboración propia.

Figura 10. **Presión de agua entrada a enfriador en función de la temperatura de salida de enfriador**



Fuente: elaboración propia.

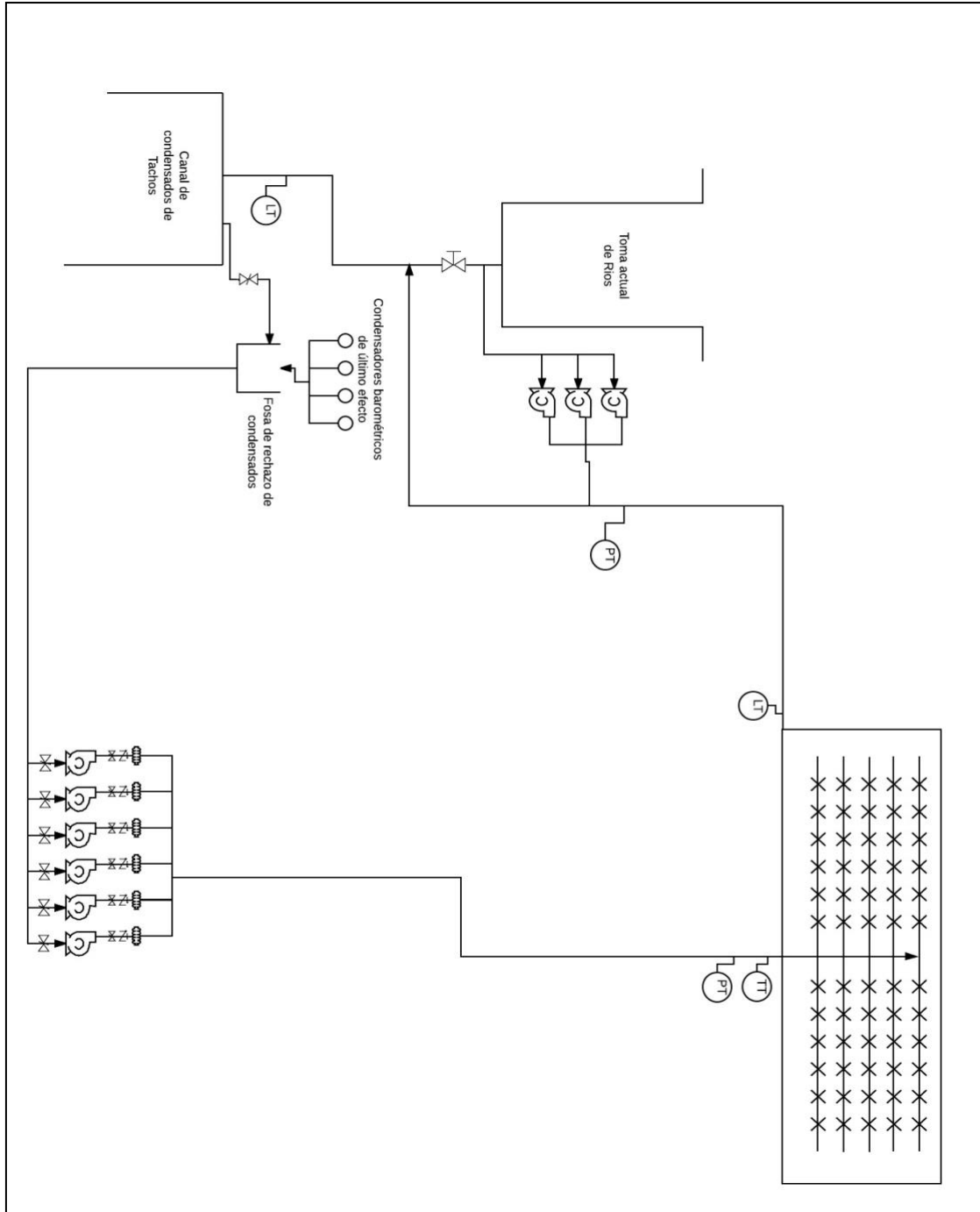
Figura 11. **Presión de agua entrada a enfriador en función del caudal de agua de río a Ingenio**



Color	R ²	R	R crítica
	0,1033	0,3213	0,231

Fuente: elaboración propia

Figura 12. Diagrama del proceso de recirculación y enfriamiento



Fuente: elaboración propia empleando AutoCAD 2014.

5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Para la elaboración del proyecto hubo dos etapas. La primera etapa consistió en realizar los cálculos pertinentes de los equipos por utilizar. La tabla X muestra los parámetros de diseño que debe tener cada una de las seis bombas centrífugas que se instaló durante la realización del proyecto.

Para que las bombas centrífugas puedan cumplir con la demanda de agua por recircular, proveniente de los condensadores del área de evaporadores y tachos, estas deben tener una cabeza total de 21,64 metros de columna de agua. Se emplea un factor de seguridad del 25 % sobre la cabeza calculada para asegurar que la bomba pueda llevar sin ningún problema la cantidad de agua requerida.

Otro parámetro, es la cabeza neta de succión positiva. Como se observa en la tabla X, la bomba cumple con la condición de que la cabeza neta de succión positiva disponible sea mayor a la cabeza neta de succión positiva requerida, dada por el fabricante, con lo cual se asegura el correcto funcionamiento de la bomba sin que esta cavite. Por otro lado, también se muestra la potencia que debe tener el motor de cada bomba, para que se entregue una potencia hidráulica suficiente que permita llevar el fluido hacia el lugar de la descarga respectiva.

La tabla XI muestra los parámetros de diseño de la pileta de enfriamiento. Como primer elemento, se observa el área que debe tener la pileta de enfriamiento. Dicha área permite que se pueda disponer las boquillas a modo que las cortinas de agua formadas por los aspersores no se superpongan o interfieran

entre sí; para que el aire pueda circular entre estos. Además, permite cargar con la capacidad de agua que ingresan y descargarla sin que existan rebalses.

Los siguientes elementos que se muestran son las temperaturas del agua en la entrada, en la salida y temperatura de bulbo húmedo: 112,19, 86,46 y 80,33 °F, respectivamente. Estas temperaturas son las que se tienen aproximadamente durante la operación. Con lo mencionado se obtiene la eficiencia teórica de la pileta de enfriamiento. Así mismo, la temperatura de bulbo húmedo establece la temperatura más baja que pueda llegar a enfriar el agua el sistema implementado.

Los últimos tres elementos de la tabla muestran las pérdidas en los sistemas de enfriamiento. Estos corresponden a las pérdidas por evaporación (1 071 gal/min), por arrastre (113,75 gal/min) y el calor que se disipa al ambiente (19,74 MW). A partir de las pérdidas surge el relleno, el cual se realiza con agua del río. Dicho relleno es controlado con el nivel de la pileta de enfriamiento, por lo que, al tener una correcta operación en fábrica, el nivel debe mantenerse y evitar el uso del agua proveniente del río.

Por último, para la primera etapa se presenta en la tabla XII el análisis económico. La tasa interna de retorno muestra la viabilidad económica del proyecto: el valor es del 90 %, lo cual demuestra que el proyecto es rentable. Sin embargo, el valor calculado para el TIR es netamente hipotético. La razón de esto es que el proyecto en sí no genera ningún ingreso hacia la empresa sino más bien un gasto representado por el consumo energético de las bombas; es decir, es un proyecto de confiabilidad.

La segunda etapa corresponde a la implementación del proyecto. La tabla XIV muestra la eficiencia real de la pileta de enfriamiento. Como se puede

observar, a partir del promedio de los datos obtenidos (ver tabla XIII) se logra determinar que el sistema resulta ser más eficiente a comparación del cálculo que se realizó en la etapa de diseño.

Por otro lado, las figuras 7 y 8 muestran los gráficos de control para la temperatura del agua en la entrada y a la salida de la pileta de enfriamiento, respectivamente. Como se puede observar en ambas figuras, los valores de temperaturas tanto a la entrada como en la salida tienden a mantenerse constantes durante los días de zafra. Esto demuestra un correcto funcionamiento en el sistema de recirculación y enfriamiento.

Así mismo, la figura 9 muestra el gráfico de control para el flujo de agua del río hacia el ingenio. Como se puede observar, la variación del agua que ingresó durante los días de zafra es bastante marcada. Esto se pudo deber a que, como se mencionó anteriormente, el agua del río funciona como relleno de la pileta de enfriamiento. La variación en los picos más altos indica mayor demanda de agua por bajo nivel en la pileta de enfriamiento, principalmente en los primeros días de operación, mientras que los picos más bajos indican que la pileta mantuvo un buen nivel de operación sin necesidad de demandar agua del relleno.

Para la figura 10 se muestra la presión de agua a la entrada de la pileta en función de la temperatura de salida del agua en la misma. Dado que el valor absoluto de $R > R_{crítica}$ para dicha gráfica, se rechaza la hipótesis nula. Se infiere que existe dependencia entre la presión del agua a la entrada de la pileta y la temperatura de salida del agua en la misma. Además, dado que el valor de R^2 es igual a 0,39, existe un bajo grado de correlación lineal.

Por último, para la figura 11 se muestra la presión de agua a la entrada de la pileta en función del caudal de agua del río hacia el ingenio. Dado que el valor

absoluto de $R > R_{\text{crítica}}$ para dicha gráfica, se rechaza la hipótesis nula. Se infiere que existe dependencia entre la presión del agua a la entrada de la pileta y el caudal de agua del río hacia el ingenio. Además, dado que el valor de R^2 es cercano a cero, el grado de correlación lineal es bajo.

6. LOGROS OBTENIDOS

Durante la zafra 2016-2017, tiempo en el que se implementó el proyecto, se pudo observar una mejora significativa respecto al consumo de agua en comparación a zafras anteriores. En primer lugar, durante los primeros meses de la zafra (aproximadamente 70 días) el consumo del agua disminuyó hasta los 0,97 m³/s de agua aproximadamente, lo cual representa una reducción del 67 % sobre el valor inicial antes de implementar el sistema de recirculación y enfriamiento. Sin embargo, conforme pasaron los meses de zafra, se logró concluir la misma sin demandar agua por parte de los ríos y se reutilizó en su totalidad el agua proveniente de los condensadores de las áreas de evaporadores y tachos, respectivamente.

CONCLUSIONES

1. La obtención de condensados en el proceso de elaboración de azúcar es en la etapa de evaporación, específicamente en el último efecto, y la cristalización, ya que en ambas se emplea vapor y es necesario tener vacío, por lo que es necesario el uso de condensadores barométricos.
2. En la industria azucarera se utilizan principalmente las torres de enfriamiento para enfriar las aguas de proceso; sin embargo, el uso de piletas de enfriamiento también se da por temas económicos y tiempo de implementación.
3. Los parámetros operativos para las bombas centrífugas son 21,64 metros de cabeza, 10,93 metros de cabeza neta de succión positiva disponible y un motor de 171,83 kW de potencia. Para la piletta de enfriamiento se debe contar con un área de 15 141 metros cuadrados, con una eficiencia teórica del 73 % y una eficiencia real del 80 %.
4. Los costos de inversión para implementar el sistema de recirculación y enfriamiento son de \$ 3 780 077,76; en lo cual se incluyen gastos de equipos, mano de obra, instalación, obra civil, obra eléctrica y automatización.
5. Los gráficos de control de la temperatura del agua, tanto a la entrada como a la salida de la piletta de enfriamiento, demuestran que el sistema de recirculación y enfriamiento es operacionalmente constante.

6. El gráfico de control del caudal de agua del río hacia el ingenio indica la mejora significativa en el consumo de agua a partir del día 43 de zafra, aproximadamente.

RECOMENDACIONES

1. Analizar el agua recirculada con el fin de evaluar el uso de químicos para el tratamiento de la misma.
2. Evaluar otros puntos en donde se demande gran cantidad de agua (agua de imbibición, agua de cenizas de calderas, etc.), darle tratamiento si lo necesita y unir el efluente al flujo de agua de recirculación con el fin de aprovechar mejor el recurso hídrico.

BIBLIOGRAFÍA

1. BETZ. *Handbook of Industrial Water Conditioning*. 6a ed. Pennsylvania, EE.UU.: Betz, 1962. 426 p. ISBN: 9780913641002.
2. CENGEL, Yunus y BOLES, Michael. *Termodinámica*. 7a ed. México D.F, México: McGraw Hill, 2012. 903 p. ISBN: 978-6071-5074-33.
3. COLOM DE MORÁN, Elisa y MORALES DE LA CRUZ, Marco. *Política Nacional del Agua en Guatemala y su Estrategia*. Guatemala, Guatemala: Gobierno de la República de Guatemala, 2011. 48 p.
4. COSTA LOPEZ, J., et. al. *Curso de ingeniería química: Introducción a los procesos, las operaciones unitarias y los fenómenos de transporte*. Barcelona, España: Reverté, 1991. 456 p. ISBN: 84-291-7126-6.
5. District, US Army Engineer. 1974. *Collins Generation Station*. Chicago, EE.UU.: Northwestern University Library, 1974. 720 p. ISBN: 5556-030-998512.
6. GHISLIERI, Daniel. *Tratamiento de agua de sistemas de enfriamiento. tecnología y servicios industriales 1*, Instituto de Ingeniería Química. Uruguay: s.n., 2009. 9 p.

7. IARNA. *Portal de Información Ambiental: IARNA. Portal de Información Ambiental*. [en línea] <<http://www.infoiar.org.gt/index.php/situacion-ambiental-de-guatemala/agua/situacion-actual>> [Consulta: 6 de julio de 2016.]
8. KERN, Donald. *Procesos de transferencia de calor*. [trad.] Nicolás Marino Ambrossi. México D.F, México : McGraw-Hill, 1999. 730 p. ISBN: 968-26-1040-0.
9. LÓPEZ FERRER, F. A. 1949. *Manual práctico de maquinaria y aparatos en los Ingenios de azúcar de caña*. 2da ed. California, EE.UU.: Cultural, 1949. 311 p.
10. PEREZ, Regina. *Una ley de aguas en Guatemala, ¿es posible?*. Diario La Hora. 2016. [en línea] <<https://www.plazapublica.com.gt/content/una-ley-de-aguas-para-el-pais-de-nunca-jamas>> [Consulta: 6 de julio de 2016]
11. PERRY, Robert. *Perry's Chemical Engineers Handbook*. 8va ed. Nueva York, EE.UU.: McGraw Hill, 2008. 1 324 p. ISBN: 0071511334.
12. REIN, Peter. *Ingeniería de la caña de azúcar*. Berlín, Alemania: Verlag Dr. Albert Bartens KG, 2012. 880 p. ISBN: 978-3-87040-142-9.
13. SEVERNS, W.H., DEGLER, H.E. y MILES, J.C. *La producción de energía mediante vapor de agua, aire y gases*. [trad.] José Batlle Gayán. Barcelona, España: Reverté, 2007. 495 p.

APÉNDICES

Apéndice 1. Muestra de cálculo de bombas centrífugas

- **Cálculo de carga estática**

Es la distancia vertical en unidades de longitud desde el nivel de suministro del fluido hasta el eje central de la bomba, y del nivel de la bomba hasta el nivel de descarga de la misma. Para el cálculo de la carga estática total de una bomba, se utiliza la siguiente ecuación:

$$C. E. T = C. E_{DESCARGA} - C. E_{SUCCIÓN} \quad \text{[Ecuación 4]}$$

Donde:

C.E.T = Cabeza estática total (m)

C.E_{DESCARGA} = Cabeza estática descarga (m)

C.E_{SUCCIÓN} = Cabeza estática succión (m)

Ejemplo:

Se desea calcular la cabeza estática de una bomba. Se cuenta con los niveles de terreno proporcionados por un topógrafo, y son de 100,76, 99 y 118 metros para la fosa de succión, la bomba y la fosa de descarga, respectivamente. Calcular lo solicitado.

$$C. E. T = (118 - 99) - (100,76 - 99)m = \mathbf{17,24 \text{ metros}}$$

Continuación apéndice 1.

- **Cálculo de carga dinámica**

Se refiere a la longitud equivalente que se tiene, producto de las pérdidas por fricción que genera el fluido en la tubería y por los accesorios que cuenta el sistema que se emplea. El cálculo de la carga dinámica se realiza así:

$$C.D.T = C.E.T + h_f \quad \text{[Ecuación 5]}$$

Donde:

C.D.T = Cabeza dinámica total (m)

h_f = Pérdidas por fricción tubería y accesorios (m)

$$\Delta P = 8 f * \left(\frac{L}{D}\right) * \frac{\rho u^2}{2} \quad \text{[Ecuación 6]}$$

Donde:

f = Factor de fricción de Darcy (Utilizar diagrama de Moody) (ver anexo 1)

L = Largo de tubería y accesorios (m)

D = Diámetro interno de tubería (m)

ρ = Densidad (kg/m^3)

u = Velocidad (m/s)

$$L = L_{\text{Tubería}} + D * \sum_i \phi_{eq} * N_i \quad \text{[Ecuación 7]}$$

Donde:

$L_{\text{Tubería}}$ = Largo de tubería (m)

D = Diámetro interno de tubería (m)

Continuación apéndice 1.

Φ_{eq} = Diámetro equivalente de accesorios (ver apéndice 1)

N_i = Cantidad de accesorios

- Diámetros equivalentes para distintos accesorios

Accesorio	Número de Diámetros Equivalentes
Codo a 45° estándar	15
Codo a 45° radio largo	10
Codo a 90° estándar	35
Codo a 90° radio largo	23
Codo a 90° codo	75
Te entrando de pierna	60
Te entrando a pierna	90
Unión y acople	2
Salida de tanque	25
Entrada de tanque	50
Válvula de compuerta	
100% Abierta	7.5
25% Abierta	800
50% Abierta	200
75% Abierta	40
Válvula de globo asiento inclinado	
100% Abierta	300
50% Abierta	450
Válvula de globo	
100% Abierta	450
50% Abierta	1800
25% Abierta	5600
Válvula de tapón - abierta	18

Fuente. PERRY, Robert. *Manual del Ingeniero Químico*. pp. 6-21.

$$u = Q/A \quad \text{[Ecuación 8]}$$

Continuación apéndice 1.

Donde:

u = Velocidad (m/s)

Q = Caudal (m³/s)

A = Área (m²)

$$Re = \frac{\rho * D * u}{\mu} \quad \text{[Ecuación 9]}$$

Donde:

Re = Número de Reynolds

D = Diámetro interno de tubería (m)

ρ = Densidad (kg/m³)

u = Velocidad (m/s)

μ = Viscosidad Dinámica (N*s/m²)

Ejemplo:

Para el sistema de bombeo en el ejemplo anterior, se tiene una capacidad de 13 000 galones por minuto, transportados en una tubería de acero de 65" de diámetro y una longitud de 605 metros. Dicha tubería cuenta con 5 codos a 45°, 1 codo a 90° radio largo y 1 "T" entrando a pierna, a lo largo de su instalación. Con esta información, calcule la carga dinámica total de la bomba a utilizar.

+ Densidad: 988 kg/m³

+ Viscosidad: 0,000547 N*s/m²

Continuación apéndice 1.

- **Paso 1.** Convertir las variables en las unidades adecuadas para las ecuaciones.

$$Q = \frac{13\,000 \text{ gal}}{\text{min}} * \frac{1 \text{ m}^3}{264,172 \text{ gal}} * \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ seg}} = 0,8202 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$D = 65 \text{ pulg} * \frac{0,0254 \text{ m}}{1 \text{ pulg}} = 1,65 \text{ m}$$

- **Paso 2.** Calcular el valor del largo equivalente de los accesorios utilizando la ecuación 7 y la Tabla I Apéndices.

$$L = 605 \text{ m} + \{1,65 \text{ m} * [(5 * 15) + (1 * 23) + (1 * 90)]\} = 915 \text{ m}$$

- **Paso 3.** Calcular la velocidad con la ecuación 8 y el número de Reynolds con la ecuación 9.

$$u = \frac{0,8202 \text{ m}^3/\text{s}}{\pi * 1,65 \text{ m}^2 / 4} = 0,38 \text{ m/s}$$

$$Re = \frac{\left(988 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) * (1,65 \text{ m}) * (0,38 \frac{\text{m}}{\text{s}})}{0,000547 \frac{\text{N} * \text{s}}{\text{m}^2}} = 1,14\text{E} + 06$$

Continuación apéndice 1.

- **Paso 4.** Al contar con el número de Reynolds, se utiliza el diagrama de Moody (Anexo 1) para determinar el factor de fricción de Darcy. Para el factor ϵ/d , se utiliza el Anexo 3 para obtener el valor de Rugosidad Absoluta del material (0,046 mm para acero comercial) y el diámetro de la tubería.

$$\epsilon/d = 0,046 \text{ mm} / (1,65 \text{E} + 03 \text{ mm}) = 0,00003$$

$$f = 0,0021$$

- **Paso 5.** Ya con todas las variables calculadas, se procede con el cálculo de las pérdidas por fricción en tuberías y accesorios con la ecuación 6. Para esta ecuación, el valor de h_f que se obtiene está expresado en forma de caída de presión (ΔP) en Pascales, por lo que se debe realizar la corrección a metros de columna de agua.

$$\Delta P = 8 * 0,0021 * \left(\frac{915 \text{ m}}{1,65 \text{ m}} \right) * \frac{(988 \text{ kg/m}^3) * (0,38 \text{ m/s})^2}{2} = 675,842 \text{ Pa}$$

$$h_f = \frac{675,842 \frac{\text{kg}}{\text{m} * \text{s}^2}}{(988 \text{ kg/m}^3) * (9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2})} = 0,7 \text{ m}$$

Continuación apéndice 1.

- **Paso 6.** Al contar con la carga estática de la bomba (ejemplo anterior) y las pérdidas por fricción calculadas, se utiliza la ecuación 5 para calcular la carga dinámica total. Dicho parámetro calculado se multiplica por un factor de seguridad del 25% para prever cualquier circunstancia que pueda presentarse.

$$C.D.T = (17,24 + 0,7) * 1,25 = \mathbf{21,64 \text{ metros}}$$

- **Cálculo de cabeza neta de succión positiva**

Se refiere a la presión estática a la que debe ser sometido un líquido para que pueda fluir por sí mismo a través de las tuberías de succión y llegar a inundar los alabes en el orificio de entrada del impulsor de una bomba. Se calcula de la siguiente manera:

$$NPSH_D = \pm P + P_{atm} - P_{vap} \pm C.E_{SUCCIÓN} - \sum(h_{f,s}) \quad [\text{Ecuación 10}]$$

Donde:

$NPSH_D$ = Cabeza neta de succión positiva disponible (m)

P = Presión externa en tanque/fosa de succión (psia)

P_{atm} = Presión atmosférica (psia)

P_{vap} = Presión de vapor a la temperatura de operación (psia)

$h_{f,s}$ = Pérdidas por fricción en la tubería de succión (m)

$C.E_{SUCCIÓN}$ = Cabeza estática succión (m)

Continuación apéndice 1.

Ejemplo:

Se desea instalar una bomba que transportará 13 000 galones de agua por minuto a 50°C. La tubería que se utilizará es de acero 65" y cuenta con 127 metros de largo, 3 codos a 45° y 1 codo a 90°. Topografía proporcionó los niveles de la fosa de succión (abierta al ambiente) y las bombas; estos son de 100,76 metros y 99 metros respectivamente. Calcular la cabeza neta de succión positiva disponible. La cabeza neta de succión positiva requerida dada por el fabricante es de 7 metros. Utilizar datos complementarios del ejemplo anterior.

- **Paso 1.** Para el cálculo de la presión externa (P), ya que la fosa se encuentra abierta al ambiente, es cero.

$$P = 0$$

- **Paso 2.** Ya que el NPSH se mide como altura de cabeza de agua, la presión atmosférica, se convierte a las unidades adecuadas.

$$P_{\text{atm}} = h = \frac{14,7 \text{ psia} * \frac{6894,757 \text{ Pa}}{1 \text{ psia}}}{\left(988 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) * \left(9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right)} = 10,47 \text{ m}$$

- **Paso 3.** La cabeza estática de succión se calcula con los datos de topografía y se convierte a las unidades adecuadas.

$$C. E_{\text{SUCCION}} = (100.76 - 99) \text{ m} = 1,76 \text{ m}$$

Continuación apéndice 1.

- **Paso 4.** Para la presión de vapor es necesario utilizar tablas de vapor. Sin embargo, ya que el fluido por utilizar es agua a 50°C, corresponde a una condición en la cual el fluido no ha alcanzado su temperatura de ebullición a las condiciones atmosféricas, por lo que se toma la sustancia como líquido saturado a la temperatura de operación. Luego, se convierte a las unidades adecuadas.
 - Tablas de vapor de agua saturada

TABLA A-4

Agua saturada. Tabla de temperaturas

Temp., T °C	Pres. sat., P _{sat} kPa	Volumen específico, m ³ /kg		Energía interna, kJ/kg			Entalpía, kJ/kg			Entropía, kJ/kg · K		
		Líqu. sat., v _f	Vapor sat., v _g	Líqu. sat., u _f	Evap., u _{fg}	Vapor sat., u _g	Líqu. sat., h _f	Evap., h _{fg}	Vapor sat., h _g	Líqu. sat., s _f	Evap., s _{fg}	Vapor sat., s _g
0.01	0.6117	0.001000	206.00	0.000	2374.9	2374.9	0.001	2500.9	2500.9	0.0000	9.1556	9.1556
5	0.8725	0.001000	147.03	21.019	2360.8	2381.8	21.020	2489.1	2510.1	0.0763	8.9487	9.0249
10	1.2281	0.001000	106.32	42.020	2346.6	2388.7	42.022	2477.2	2519.2	0.1511	8.7488	8.8999
15	1.7057	0.001001	77.885	62.980	2332.5	2395.5	62.982	2465.4	2528.3	0.2245	8.5559	8.7803
20	2.3392	0.001002	57.762	83.913	2318.4	2402.3	83.915	2453.5	2537.4	0.2965	8.3696	8.6661
25	3.1698	0.001003	43.340	104.83	2304.3	2409.1	104.83	2441.7	2546.5	0.3672	8.1895	8.5567
30	4.2469	0.001004	32.879	125.73	2290.2	2415.9	125.74	2429.8	2555.6	0.4368	8.0152	8.4520
35	5.6291	0.001006	25.205	146.63	2276.0	2422.7	146.64	2417.9	2564.6	0.5051	7.8466	8.3517
40	7.3851	0.001008	19.515	167.53	2261.9	2429.4	167.53	2406.0	2573.5	0.5724	7.6832	8.2556
45	9.5953	0.001010	15.251	188.43	2247.7	2436.1	188.44	2394.0	2582.4	0.6386	7.5247	8.1633
50	12.352	0.001012	12.026	209.33	2233.4	2442.7	209.34	2382.0	2591.3	0.7038	7.3710	8.0748

Fuente. CENGEL, Yunes. *Termodinámica*. p. 914.

$$P_{\text{vap}} = \frac{12,352 \text{ kPa} \cdot \frac{1000 \text{ Pa}}{1 \text{ kPa}}}{\left(988 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) \cdot \left(9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right)} = 1,2757 \text{ m}$$

Continuación apéndice 1.

- **Paso 5.** Calcular el valor del largo equivalente de los accesorios utilizando la ecuación 7 y el apéndice 1.

$$L = 127 \text{ m} + \{1,65 \text{ m} * [(3 * 15) + (1 * 23)]\} = 239,2 \text{ m}$$

- **Paso 6.** Calcular la velocidad con la ecuación 8 y el número de Reynolds con la ecuación 9.

$$u = \frac{0,8202 \text{ m}^3/\text{s}}{\pi * 1,65 \text{ m}^2 / 4} = 0,38 \text{ m/s}$$

$$Re = \frac{(988 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}) * (1,65 \text{ m}) * (0,38 \frac{\text{m}}{\text{s}})}{0,000547 \frac{\text{N} * \text{s}}{\text{m}^2}} = 1,14\text{E} + 06$$

- **Paso 7** Al contar con el número de Reynolds, se utiliza el diagrama de Moody (Anexo 1) para determinar el factor de fricción de Darcy. Para el factor ε/d , se utiliza el apéndice 5 para obtener el valor de Rugosidad Absoluta del material (0,046 mm para acero comercial) y el diámetro de la tubería.

$$\varepsilon/d = 0,046 \text{ mm} / (1,65\text{E} + 03 \text{ mm}) = 0,00003$$

$$f = 0,0021$$

Continuación apéndice 1.

- **Paso 8.** Ya teniendo todas las variables calculadas, se procede con el cálculo de las pérdidas por fricción en tuberías y accesorios con la ecuación 6. Para esta ecuación, el valor de h_f que se obtiene está en Pascales, por lo que se debe realizar la corrección a metros de columna de agua.

$$\Delta P = 8 * 0,0021 * \left(\frac{239,2 \text{ m}}{1,65 \text{ m}} \right) * \frac{(988 \text{ kg/m}^3) * (0,38 \text{ m/s})^2}{2} = 176,529 \text{ Pa}$$

$$h_f = \frac{176,529 \frac{\text{kg}}{\text{m} * \text{s}^2}}{(988 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}) * (9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2})} = 0,018 \text{ m}$$

- **Paso 9.** Al tener todas las variables, se calcula el NPSHD y se verifica que cumpla con el NPSHR que proporcionó el fabricante, que es de 7 metros.

$$\text{NPSH}_D = [10,47 + 1,76 - 1,28 - 0,018] \text{m} = 10,934 \text{ m}$$

$$\text{NPSH}_D = 10,934 \text{ m}$$

$$\text{NPSH}_R < \text{NPSH}_D$$

$$7 \text{ metros} < 10,5 \text{ metros}$$

- **Cálculo de potencia**

Cuando se refiere a la potencia de una bomba, no se habla específicamente de la bomba, sino más bien del motor que esta empleará para trabajar de acuerdo a los requerimientos para los que se utilizará.

Continuación apéndice 1.

Así, se define la potencia de una bomba como la energía consumida por la máquina en la unidad de tiempo establecida.

$$W = Q * \rho * g * CDT / 1\ 000 \quad [\text{Ecuación 11}]$$

Donde:

W = Potencia (kW)

Q = Caudal (m³/s)

ρ = Densidad (kg/m³)

g = Aceleración (m/s²)

C.D.T = Cabeza dinámica total (m)

Ejemplo:

Para la bomba de los ejemplos anteriores, calcular la potencia de la bomba en kilo-vatios.

- **Paso 1.** A partir de la ecuación 11 y los cálculos realizados en los ejemplos anteriores se calcula la potencia de la bomba.

$$W = \left(0,8202 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} * 988 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} * 21,637 \text{ m} \right) / 1000 = 171,827 \text{ KW}$$

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. Muestra de cálculo de pileta de enfriamiento

- **Cálculo de área de pileta de enfriamiento**

El área de una pileta es importante debido a la necesidad de disponer las boquillas de modo que las cortinas de agua formadas por ellas no se superpongan o interfieren entre sí, y para que el aire pueda circular entre los aspersores. Hugot sugiere que el área de la pileta A se debe relacionar con el flujo de agua m_w mediante la siguiente relación:

$$\frac{m_w}{A} = 750 \text{ kg/h} * m^2 \quad \text{[Ecuación 12]}$$

Donde:

m_w = Flujo másico de agua (kg/h)

A = Área de pileta de enfriamiento (m^2)

Ejemplo:

Se desea calcular el área de una pileta de enfriamiento para una capacidad de 50 000 gal/min de agua.

- **Paso 1.** Despejar la ecuación 1 para el área.

$$A = \frac{m_w}{750 \text{ kg/h} * m^2}$$

Continuación apéndice 2.

- **Paso 2.** A partir del caudal proporcionado, con la densidad del agua, obtener el flujo másico.

$$\dot{m}_w = 50\,000 \frac{\text{gal}}{\text{min}} * \frac{1 \text{ m}^3}{264,172 \text{ gal}} * \frac{1\,000 \text{ kg}}{\text{m}^3} * \frac{60 \text{ min}}{1 \text{ h}} = 11\,356\,237,60 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

- **Paso 3.** Con el flujo másico obtenido, y utilizando la ecuación # 8 despejada se calcula el área de la pileta.

$$A = \frac{11\,356\,237,60 \frac{\text{kg}}{\text{h}}}{750 \text{ kg/h} \cdot \text{m}^2}$$

$$A = 15\,141,65 \text{ m}^2$$

- **Cálculo de eficiencia de la pileta de enfriamiento**

La eficacia del sistema depende principalmente de la humedad relativa del aire. La eficiencia puede ser calculada a partir de la siguiente ecuación:

$$\eta = \frac{T_h - T_c}{T_h - T_w} \quad [\text{Ecuación 13}]$$

Donde:

η = Eficiencia

T_h = Temperatura agua caliente (°C/°F)

T_c = Temperatura agua fría (°C/°F)

T_w = Temperatura bulbo húmedo (°C/°F)

Continuación apéndice 2.

Ejemplo:

Se necesita determinar la eficiencia que puede llegar a tener una pileta de enfriamiento que llevará agua de 46°C a 32°C. Para ello, los ingenieros a cargo del diseño han determinado que la temperatura de bulbo húmedo en el lugar de la pileta es de 26,85°C. Calcule lo solicitado.

$$\eta = \frac{(46 - 32)^{\circ}\text{C}}{(46 - 26,85)^{\circ}\text{C}} * 100$$

$$\eta = 73\%$$

- **Cálculo de capacidad de boquilla**

Las principales características de diseño que deben tener las boquillas son:

- Entregar el agua en forma de cono.
- Ser de diseño simple, fácilmente desmontables con ninguna porción de sección transversal menor que el orificio.

Así, la capacidad de descarga de una boquilla se calcula de la siguiente forma:

$$q = C * S * \sqrt{2 * g * H} \quad [\text{Ecuación 14}]$$

Continuación apéndice 2.

Donde:

q = Capacidad de la boquilla (m³/s)

C = Coeficiente de contracción (0,5)

S = Área de sección transversal de orificio (m²)

g = Gravedad (9,8 m/s²)

H = Presión de cabeza de agua, (0,5 m)

Ejemplo:

Se desea calcular el agua que se expulsará en una pileta de enfriamiento, que funcionará con aspersores. Para ello se cuenta con un sistema de aspersores con un diámetro de boquilla de 2 3/4". Cada aspersor contará con 5 boquillas y habrá un total de 130 sets.

$$q = \left[(0,5) * \left(\frac{\pi * (0,0699 \text{ m})^2}{4} \right) * \sqrt{2 * (9,81 \text{ m/s}^2) * (0,5 \text{ m})} \right] * 5 * 130$$

$$q = 3,90 \text{ m}^3/\text{s} = 61\,795,54 \text{ gal}/\text{min}$$

- **Cálculo de pérdida por evaporación en pileta de enfriamiento**

Las pérdidas por evaporación surgen a raíz de la descarga de vapor a la atmósfera con el siguiente arrastre de calor de vaporización. De esta cuenta, se considera que por cada 10°F de enfriamiento se evapora el 1% del agua de recirculación.

Continuación apéndice 2.

$$E = \frac{Q * \Delta T}{1\,000\ ^\circ F} * F.C. \quad \text{[Ecuación 15]}$$

Donde:

E = Agua evaporada (gal/min)

Q = Caudal (gal/min)

ΔT = Diferencial de temperatura ($^\circ F$)

F.C. = Factor de corrección (0,85)

Ejemplo:

Para una pileta de enfriamiento que se le suministrará 50 000 gal/min de agua caliente a 115 $^\circ F$ y se pretende enfriar, idealmente, hasta 90 $^\circ F$, calcular la cantidad de agua evaporada en la pileta.

$$E = \frac{50\,000\ \text{gal}/\text{min} * (115 * 90)^\circ F}{1\,000\ ^\circ F} * 0,85$$

$$E = 1\,062,5\ \text{gal}/\text{min}$$

- **Cálculo de pérdida por arrastre en pileta de enfriamiento**

Las pérdidas por arrastre surgen a partir de las corrientes de aire que pasan por la pileta. A partir de ello, para las condiciones del ambiente en el lugar donde se instala el sistema de enfriamiento, existen factores de arrastre causados por el viento.

Continuación apéndice 2.

$$a = Q * F.A. \quad \text{[Ecuación 16]}$$

Donde:

a = Agua pérdida por arrastre (gal/min)

Q = Caudal (gal/min)

F.A. = Factor de arrastre (0,1% - 0,25%)

Ejemplo:

Para el ejemplo anterior, calcular las pérdidas por arrastre del sistema de enfriamiento de agua.

$$a = (50\,000 \text{ gal}/\text{min}) * 0,00175$$

$$E = 113,75 \text{ gal}/\text{min}$$

- **Cálculo de calor disipado en pileta de enfriamiento**

Al enfriarse el agua de la pileta de enfriamiento, se cumple la primera ley de la termodinámica, cuando el calor que se libera del agua es disipado hacia el ambiente en forma de calor sensible (elevación de temperatura) y calor latente (agua evaporada). Para el cálculo de ambos tipos de calor se tiene lo siguiente:

$$\dot{Q}_{SENS} = \dot{m}_W * C_p * \Delta T \quad \text{[Ecuación 17]}$$

Continuación apéndice 2.

Donde:

Q_{SENS} = Flujo de calor sensible (J/h)

m_W = Flujo másico de agua (kg/h)

C_p = Capacidad calorífica (J/kg*K)

ΔT = Diferencial de temperatura (K)

$$\dot{Q}_{LAT} = \dot{m}_W * \Delta H_{vap} \quad \text{[Ecuación 18]}$$

Donde:

Q_{LAT} = Flujo de calor latente (J/h)

m_W = Flujo másico de agua (evaporada)(kg/h)

ΔH_{vap} = Entalpía de vaporización

$$\dot{Q}_{TOTAL} = \dot{Q}_{SENS} + \dot{Q}_{LAT} \quad \text{[Ecuación 19]}$$

Donde:

Q_{TOTAL} = Flujo de calor total (J/h)

Q_{SENS} = Flujo de calor sensible (J/h)

Q_{LAT} = Flujo de calor latente (J/h)

Ejemplo:

Se desea calcular el calor que disipará en una pileta de enfriamiento que recibirá 50 000 gal/min de agua a 46°C y la enfriará hasta 32°C. La cantidad de agua que se evapora por pérdidas es de 1 062,5 gal/min. Calcular lo solicitado.

Continuación apéndice 2.

- **Paso 1.** Convertir los respectivos caudales a flujos máscicos.

$$50\,000 \frac{\text{gal}}{\text{min}} * \frac{1 \text{ m}^3}{264,172 \text{ gal}} * \frac{992,9 \text{ kg}}{\text{m}^3} * \frac{60 \text{ min}}{1 \text{ h}} = 11\,275\,608,32 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

$$1\,0625,5 \frac{\text{gal}}{\text{min}} * \frac{1 \text{ m}^3}{264,172 \text{ gal}} * \frac{992,9 \text{ kg}}{\text{m}^3} * \frac{60 \text{ min}}{1 \text{ h}} = 239\,606,67 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

- **Paso 2.** Buscar los valores de C_p y ΔH_{vap} para los cálculos.

$$C_p = 417,84 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} ; \Delta H_{\text{vap}} = 2\,257 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

- **Paso 3.** Calcular el calor sensible.

$$\dot{Q}_{\text{SENS}} = \frac{\left[11\,275\,608,32 \frac{\text{kg}}{\text{h}} * 417,84 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} * (319,15 - 305,15) \right]}{1 \text{ E}9} = 65,96 \text{ GJ/h}$$

- **Paso 4.** Calcular el calor latente.

$$\dot{Q}_{\text{LAT}} = \frac{239\,606,67 \frac{\text{kg}}{\text{h}} * 2\,257 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}}{1 \text{ E}6} = 540,79 \text{ GJ/h}$$

Continuación apéndice 2.

- **Paso 5.** Calcular el calor total.

$$\dot{Q}_{TOTAL} = (65,96 + 540,79) \frac{GJ}{h} * \frac{1 h}{3600 s} * \frac{1 000 MJ}{1 GJ} =$$

$$\dot{Q}_{TOTAL} = 168,54 \text{ MW}$$

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 3. **Muestra de cálculo de tasa interna de retorno**

- **Cálculo de tasa interna de retorno**

Para el cálculo de la tasa interna de retorno se debe hacer énfasis en dos puntos. El primero es la definición de la tasa interna de retorno, la cual corresponde a aquella que iguala el valor presente neto a cero. También conocida como tasa de rentabilidad, es el producto de la reinversión de los flujos netos de efectivo dentro de la operación propia del negocio y se expresa en porcentaje. Es importante mencionar que, mientras más alto el TIR, más rentable es el proyecto.

El segundo punto corresponde a que dicho cálculo es hipotético para el proyecto por realizar. Al no existir en el proceso un ingreso aportado a la empresa por parte del proyecto de recirculación, sino más bien un gasto por el consumo energético de las bombas, el valor del TIR se vuelve imposible de calcular. Como se mencionaba en el primer punto, dicho cálculo representa la reinversión de los flujos netos de efectivo dentro de la operación propia del negocio.

Continuación apéndice 3.

Ahora bien, el cálculo de la tasa interna de retorno era hipotético. Se debe asumir un precio para el agua y comparar el ahorro que representará instalar el sistema de enfriamiento y recirculación si existiera en Guatemala un costo en el consumo de agua en la industria y así determinar la tasa interna de retorno.

$$VPN = \sum_{t=1}^n \frac{\$}{(1+i)^t} - Inversión \quad [Ecuación 20]$$

Donde:

VPN = Valor presente neto

\$ = Flujo de dinero en el tiempo "t"

i = Interés

t = Tiempo

Inversión = Flujo de dinero en el tiempo cero

$$0 = \sum_{t=1}^n \frac{\$}{(1+TIR)^t} - Inversión \quad [Ecuación 21]$$

Donde:

\$ = Flujo de dinero en el tiempo "t"

t = Tiempo

Inversión = Flujo de dinero en el tiempo cero

TIR = Tasa Interna de Retorno

Continuación apéndice 3.

Ejemplo:

Se desea saber la rentabilidad de un proyecto en el cual se implementará un sistema que permita recircular agua de proceso y enfriarla. El proyecto se realizará en un ingenio azucarero que tiene una zafra de 180 días aproximadamente (6 meses). Dicho sistema pretende reducir el consumo de agua desde 3 metros cúbicos por segundo y llevar el consumo hasta 3 000 galones por minuto. El precio del agua es de Q 3,60 por metro cúbico. La inversión realizada para dicho proyecto es de Q. 31 795 486,84. Calcular la tasa interna de retorno para determinar la rentabilidad del proyecto.

- **Paso 1.** Convertir las variables en las unidades adecuadas para las ecuaciones.

$$Q = \frac{3\,000 \text{ gal}}{\text{min}} * \frac{1 \text{ m}^3}{264,172 \text{ gal}} * \frac{60 \text{ min}}{1 \text{ h}} * \frac{24 \text{ h}}{1 \text{ día}} * 180 \text{ días} = 2\,943\,536,79 \text{ m}^3$$

$$Q = \frac{3 \text{ m}^3}{\text{s}} * \frac{60 \text{ s}}{1 \text{ min}} * \frac{60 \text{ min}}{1 \text{ h}} * \frac{24 \text{ h}}{1 \text{ día}} * 180 \text{ días} = 46\,656\,000 \text{ m}^3$$

- **Paso 2.** Calcular el costo el agua por metro cúbico consumido.

$$\$3\,000 \text{ gpm} = 2\,943\,536,79 \text{ m}^3 * \left(\frac{Q\,3,60}{\text{m}^3} + (Q\,3,60 * 0,12) \right) = Q\,11\,868\,340,32$$

$$\$3 \text{ m}^3 = 46\,656\,000 \text{ m}^3 * \left(\frac{Q\,3,60}{\text{m}^3} + (Q\,3,60 * 0,12) \right) = Q\,188\,116\,992,00$$

Continuación apéndice 3.

- **Paso 3.** Calcular el flujo de ingresos en cada mes.

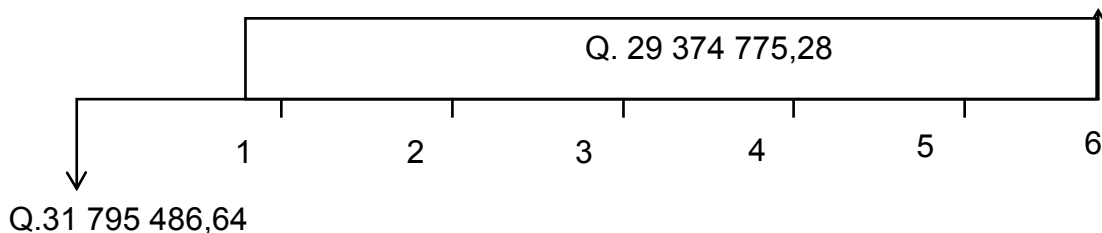
$$\$3\ 000\ \text{gpm} = \frac{Q\ 11\ 868\ 340,32}{6\ \text{meses}} = Q\ 31\ 352\ 832,00\ /\text{mes}$$

$$\$3\ \text{m}^3 = \frac{Q\ 188\ 116\ 992,00}{6\ \text{meses}} = Q\ 1\ 978\ 056,72\ /\text{mes}$$

Nota: para el cálculo de los ingresos en cada mes, al no tener un flujo de ingreso de efectivo generado por el proyecto, se puede asumir que los ingresos que genera el sistema de enfriamiento corresponden a un ahorro que se produce por la diferencia de pagar el agua al tener 3 000 galones por minuto y pasar a 3 metros cúbicos.

$$\$ = Q\ 31\ 352\ 832,00/\text{mes} - Q\ 1\ 978\ 056,72/\text{mes} = Q\ 29\ 374\ 775,28/\text{mes}$$

- **Paso 4.** Realizar un diagrama de flujo de efectivo.



- **Paso 5.** Utilizando la ecuación 15, se calcula la tasa interna de retorno.

$$0 = \left[\frac{29\ 374\ 775,28}{(1 + \text{TIR})^1} + \frac{29\ 374\ 775,28}{(1 + \text{TIR})^2} + \frac{29\ 374\ 775,28}{(1 + \text{TIR})^3} + \frac{29\ 374\ 775,28}{(1 + \text{TIR})^4} + \frac{29\ 374\ 775,28}{(1 + \text{TIR})^5} + \frac{29\ 374\ 775,28}{(1 + \text{TIR})^6} - 31\ 795\ 486,64 \right] * 100$$

$$\text{TIR} = 90\ \%$$

Continuación apéndice 3.

Nota: es importante recordar, que dicho cálculo realizado es hipotético, ya que, para el caso real del proyecto, no existe Tasa Interna de Retorno sino que el proyecto es más bien de confiabilidad. Esto se debe a que no se tiene ingresos y sí gastos por consumo en el uso de las bombas, además de que el proyecto es absolutamente dependiente de la operación.

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 4. Requisitos académicos



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 5. Árbol de problemas



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 6. Valores rugosidad absoluta de materiales

Material	Rugosidad Absoluta (mm) (ϵ)
Tubería abierta	0,0015
Tubería acero comercial	0,046
Tubería hierro fundido	0,26
Tubería de concreto	1,65

Fuente: elaboración propia.

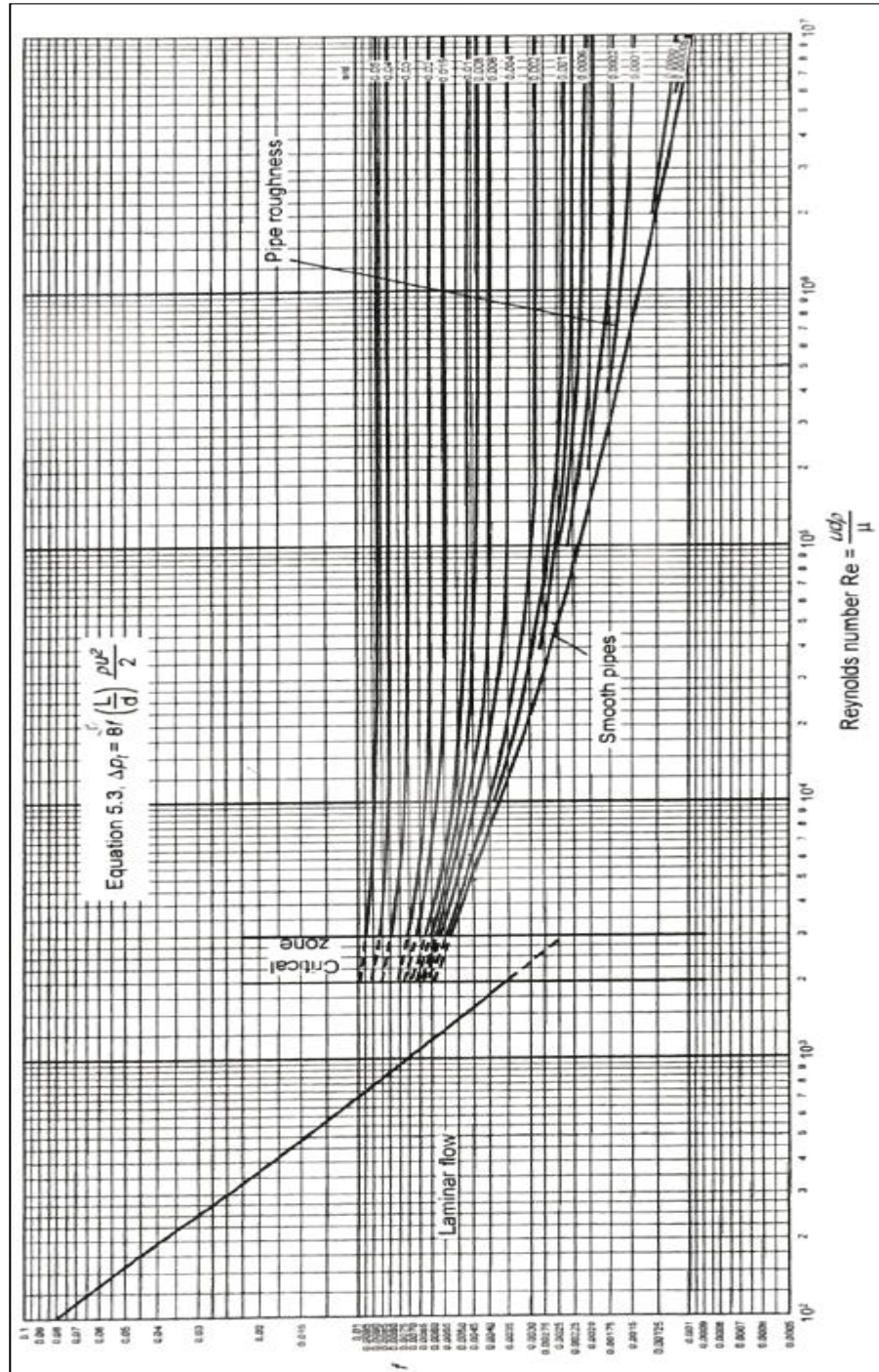
Apéndice 7. Valores críticos de R de Pearson

N - 2	0.05	0.025	0.01	0.005
1	0.988	0.997	0.9995	0.9999
2	0.900	0.950	0.980	0.990
3	0.805	0.878	0.934	0.959
4	0.729	0.811	0.882	0.917
5	0.669	0.754	0.833	0.874
6	0.622	0.707	0.789	0.834
7	0.582	0.666	0.750	0.798
8	0.549	0.632	0.716	0.765
9	0.521	0.602	0.685	0.735
10	0.497	0.576	0.658	0.708
11	0.476	0.553	0.634	0.684
12	0.458	0.532	0.612	0.661
13	0.441	0.514	0.592	0.641
14	0.426	0.497	0.574	0.623
15	0.412	0.482	0.558	0.606
16	0.400	0.468	0.542	0.590
17	0.389	0.456	0.528	0.575
18	0.378	0.444	0.516	0.561
19	0.369	0.433	0.503	0.549
20	0.360	0.423	0.492	0.537
21	0.352	0.413	0.482	0.526
22	0.344	0.404	0.472	0.515
23	0.337	0.396	0.462	0.505
24	0.330	0.388	0.453	0.496
25	0.323	0.381	0.445	0.487
26	0.317	0.374	0.437	0.479
27	0.311	0.367	0.430	0.471
28	0.306	0.361	0.423	0.463
29	0.301	0.355	0.416	0.456
30	0.296	0.349	0.409	0.449
35	0.275	0.325	0.381	0.418
40	0.257	0.304	0.358	0.393
45	0.243	0.288	0.338	0.372
50	0.231	0.273	0.322	0.354
60	0.211	0.250	0.295	0.325
70	0.195	0.232	0.274	0.302
80	0.183	0.217	0.256	0.283
90	0.173	0.205	0.242	0.267
100	0.164	0.195	0.230	0.254

Fuente: elaboración propia.

ANEXOS

Anexo 1. Diagrama de Moody



Fuente: PERRY, Robert. *Manual del Ingeniero Químico*. pp. 6-10.

