



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica Industrial

**REDISEÑO DE PARÁMETROS OPERATIVOS EN LOS SISTEMAS DE
CONDENSACIÓN Y ENFRIAMIENTO DEL DEPARTAMENTO DE AGUAS
INDUSTRIALES DE FÁBRICA, INGENIO LA UNIÓN S. A.**

Edwin Estuardo Salas Galindo

Asesorado por la Inga. Sigrid Alitza Calderón de León

Guatemala, enero de 2016

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**REDISEÑO DE PARÁMETROS OPERATIVOS EN LOS SISTEMAS DE
CONDENSACIÓN Y ENFRIAMIENTO DEL DEPARTAMENTO DE AGUAS
INDUSTRIALES DE FÁBRICA, INGENIO LA UNIÓN S. A.**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

EDWIN ESTUARDO SALAS GALINDO

ASESORADO POR LA INGA. SIGRID ALITZA CALDERÓN DE LEÓN

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO MECÁNICO INDUSTRIAL

GUATEMALA, ENERO DE 2016

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	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Raúl Eduardo Ticún Córdova
VOCAL V	Br. Henry Fernando Duarte García
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADORA	Inga. Sigrid Alitza Calderón de León
EXAMINADOR	Ing. Jaime Humberto Batten Esquivel
EXAMINADORA	Inga. Nora Leonor García Tobar
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:

REDISEÑO DE PARÁMETROS OPERATIVOS EN LOS SISTEMAS DE CONDENSACIÓN Y ENFRIAMIENTO DEL DEPARTAMENTO DE AGUAS INDUSTRIALES DE FÁBRICA, INGENIO LA UNIÓN S. A.

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Industrial, con fecha mayo de 2014.



Edwin Estuardo Salas Galindo

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA
UNIDAD DE EPS

Guatemala, 30 de octubre de 2015.
REF.EPS.DOC.741.10.15.

Ingeniero
Silvio José Rodríguez Serrano
Director Unidad de EPS
Facultad de Ingeniería
Presente

Estimado Ing. Rodríguez Serrano:

Por este medio atentamente le informo que como Asesora-Supervisora de la Práctica del Ejercicio Profesional Supervisado, (E.P.S) del estudiante universitario de la Carrera de Ingeniería Mecánica Industrial, **Edwin Estuardo Salas Galindo**, Carné No. 200915726 procedí a revisar el informe final, cuyo título es: **REDISEÑO DE PARÁMETROS OPERATIVOS EN LOS SISTEMAS DE CONDENSACIÓN Y ENFRIAMIENTO DEL DEPARTAMENTO DE AGUAS INDUSTRIALES DE FÁBRICA, INGENIO LA UNIÓN S.A..**

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"

Inga. Sigrid Alliza Calderón de León
Asesor-Supervisor de EPS
Área de Ingeniería Mecánica Industrial



SACdL/ra

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA
UNIDAD DE EPS

Guatemala, 30 de octubre de 2015.
REF.EPS.D.583.10.15

Ingeniero
César Ernesto Urquizú Rodas
Director
Escuela de Ingeniería Mecánica Industrial
Facultad de Ingeniería
Presente

Estimado Ing. Urquizú Rodas:

Por este medio atentamente le envío el informe final correspondiente a la práctica del Ejercicio Profesional Supervisado, (E.P.S) titulado **REDISEÑO DE PARÁMETROS OPERATIVOS EN LOS SISTEMAS DE CONDENSACIÓN Y ENFRÍAMIENTO DEL DEPARTAMENTO DE AGUAS INDUSTRIALES DE FÁBRICA, INGENIO LA UNIÓN S.A.**, que fue desarrollado por el estudiante universitario, **Edwin Estuardo Salas Galindo** quien fue debidamente asesorado y supervisado por la Inga. Sigrid Alitza Calderón de León.

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

Sin otro particular, me es grato suscribirme.

Atentamente,
"Id y Enseñad a Todos"

Ing. Silvio José Rodríguez Serrano
Director Unidad de EPS



SJRS/ra

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA

REF.REV.EMI.163.015

Como Catedrático Revisor del Trabajo de Graduación titulado **REDISEÑO DE PARÁMETROS OPERATIVOS EN LOS SISTEMAS DE CONDENSACIÓN Y ENFRIAMIENTO DEL DEPARTAMENTO DE AGUAS INDUSTRIALES DE FÁBRICA, INGENIO LA UNION S. A.**, presentado por el estudiante universitario **Edwin Estuardo Salas Galindo**, apruebo el presente trabajo y recomiendo la autorización del mismo.

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”

Inga. Nora Leonor ~~Elizabeth~~ Garcia Tobar
Catedrático Revisor de Trabajos de Graduación
Escuela de Ingeniería Mecánica Industrial



Guatemala, noviembre de 2015.

/mgp

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA

REF.DIR.EMI.007.016

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Industrial de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor, el Visto Bueno del Revisor y la aprobación del Área de Lingüística del trabajo de graduación titulado **REDISEÑO DE PARÁMETROS OPERATIVOS EN LOS SISTEMAS DE CONDENSACIÓN Y ENFRÍAMIENTO DEL DEPARTAMENTO DE AGUAS INDUSTRIALES DE FÁBRICA, INGENIO LA UNIÓN S. A.**, presentado por el estudiante universitario **Edwin Estuardo Salas Galindo**, aprueba el presente trabajo y solicita la autorización del mismo.

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”


Ing. **Juan José Peralta Dardón**
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Mecánica Industrial



Guatemala, enero de 2016.

/mgp

Universidad de San Carlos
De Guatemala

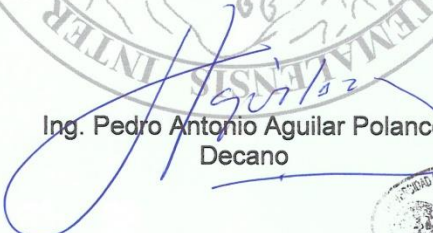


Facultad de Ingeniería
Decanato

Ref. DTG.036-2016

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 Mecánica Industrial, al trabajo de graduación titulado: **REDISEÑO DE PARÁMETROS OPERATIVOS EN LOS SISTEMAS DE CONDENSACIÓN Y ENFRIAMIENTO DEL DEPARTAMENTO DE AGUAS INDUSTRIALES DE FÁBRICA, INGENIO LA UNIÓN S.A.**, presentado por el estudiante universitario: **Edwin Estuardo Salas Galindo**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.


Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Decano



Guatemala, enero de 2016

/cc

ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Por ser quien ha guiado mi camino y gracias a sus bendiciones en mi vida he podido alcanzar cada meta propuesta.
- Mis padres** Hugo Enrique Salas Barberena y Sofía Eugenia Galindo Sánchez. Pilares en mi vida que han aportado todo de sí con amor y entrega. Todo lo que he logrado es gracias a ustedes.
- Mis hermanos** Guillermo Enrique, Melissa Eugenia y Regina Alejandra Salas Galindo, porque más que mis hermanos son mis amigos más preciados.
- Mi abuela** Virginia Sánchez, por ser una segunda madre para mí y porque su presencia ha marcado mi vida.
- Mi tía** Elsa Galindo (q. e. p. d.), porque sus consejos, amor y ejemplo de vida me alentaron en cada momento.
- Mi abuelo** Enrique Salas (q. e. p. d.), por ser un hombre de bien, cuyo legado está en cada una de las personas que lo recordamos con amor.

Mi familia

Abuelos, tíos, primos y sobrinos. Gracias por todo el cariño y la alegría que sin reservas han dado a mi vida.

Mi asesor

Por el apoyo y guía recibido en cada momento, le estoy muy agradecido.

Mis amigos

Todos aquellos que me brindaron su amistad y con los que pude compartir buenos momentos, en especial a Carlos Coronado, Darlineth Alonzo, Débora Calderón, Dennis Pérez, Francisco Reyes, Lester Bautista, Manuel Echeverría, Roberto Ramírez y Rodolfo Taque.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por ser el alma máter de mi formación profesional.
Facultad de Ingeniería	Por el conocimiento adquirido y por inculcar el deseo de siempre seguir aprendiendo.
Escuela de Ingeniería Mecánica Industrial	Por ser el impulsor del crecimiento profesional de mi persona.
Ing. Arturo Bautista	Por su apoyo al brindarme la oportunidad de aprender y crecer, sin mermar su ayuda en ningún momento.
Ing. Víctor Linares	Por todos los consejos, paciencia, consideración y apoyo que he recibido de su persona, le agradezco por tratar de hacer de mí un buen profesional.
Inga. Sigrid Calderón	Por su apoyo y guía en la elaboración de mi proyecto de graduación.
Ingenio La Unión	Por recibirme con puertas abiertas. Gracias a todos los que me brindado su apoyo y amistad.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS	XI
GLOSARIO	XV
RESUMEN.....	XIX
OBJETIVOS.....	XXI
INTRODUCCIÓN.....	XXIII
1. GENERALIDADES INGENIO LA UNIÓN S. A.	1
1.1. Fundación e historia	1
1.2. Descripción.....	2
1.3. Misión	2
1.4. Visión.....	3
1.5. Valores	3
1.6. Ubicación.....	3
1.7. Estructura organizacional de la empresa.....	4
1.8. Resumen del proceso de fabricación de azúcar.....	6
1.8.1. Extracción de jugo	7
1.8.2. Sulfitación	8
1.8.3. Alcalización.....	9
1.8.4. Clarificación	10
1.8.5. Filtración	11
1.8.6. Evaporación.....	12
1.8.7. Cristalización	13
1.8.8. Centrifugación.....	14
1.8.9. Secado	15

1.8.10.	Envasado	16
2.	FASE DE SERVICIO TÉCNICO PROFESIONAL	19
2.1.	Diagnóstico de la situación actual	19
2.1.1.	Sistema de condensación en área de recuperación de sacarosa	19
2.1.2.	Sistema de enfriamiento de sistema de aguas industriales de fábrica	29
2.2.	Resumen de montaje de torre de enfriamiento	34
2.2.1.	Consulta de manuales.....	35
2.2.2.	Descarga de materiales.....	37
2.2.3.	Armado de estructura.....	38
2.2.4.	Montaje de elementos mecánicos	39
2.2.5.	Actividades complementarias.....	40
2.3.	Metodología de cálculo	41
2.3.1.	Sistema de condensación	41
2.3.1.1.	Balanceo de masa y energía	44
2.3.1.2.	Recolección de datos	48
2.3.1.3.	Cálculo de consumo de agua	53
2.3.1.4.	Presentación y análisis de resultados ..	59
2.3.2.	Sistema de enfriamiento.....	62
2.3.2.1.	Recolección de datos	62
2.3.2.2.	Balanceo de masa y energía	64
2.3.2.3.	Cálculo de eficiencia térmica.....	82
2.3.2.4.	Presentación y análisis de resultados.....	85
2.3.2.5.	Comparación de consumo de agua.....	86
2.4.	Ejecución del proyecto	89
2.4.1.	Establecimiento de parámetros de operación	89

2.4.2.	Equipo de medición	93
2.5.	Análisis económico	96
2.6.	Manuales	108
3.	FASE DE INVESTIGACIÓN. PROPUESTA PARA LA REDUCCIÓN DEL USO DE AGUA	115
3.1.	Diagnóstico de la situación actual	115
3.1.1.	Análisis del consumo de agua	126
3.1.1.1.	Consumo de agua en sanitarios	126
3.1.1.2.	Representación grafica de consumo de agua.....	128
3.2.	Propuesta de reducción de consumo de agua	129
3.2.1.	Plan de acción para reducción de consumo de agua.....	129
3.2.2.	Nuevo consumo de agua.....	131
3.2.3.	Costo para implementación	132
3.2.4.	Ahorro por implementación	132
4.	FASE DE DOCENCIA	133
4.1.	Diagnóstico de necesidad de capacitación.....	133
4.1.1.	Planificación de capacitaciones	138
4.1.2.	Programas de capacitación	139
4.1.3.	Evaluación de capacitaciones.....	140
	CONCLUSIONES	145
	RECOMENDACIONES	147
	BIBLIOGRAFÍA.....	149
	APÉNDICES	151
	ANEXOS.....	161

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Ubicación Ingenio La Unión	4
2.	Organigrama de fábrica, Ingenio La Unión.....	6
3.	Extracción de jugo, molino para caña	7
4.	Sulfitación, torre de sulfitación	8
5.	Alcalización, silo de cal	9
6.	Clarificación, clarificador de bandeja.....	10
7.	Filtración, filtro banda	11
8.	Evaporación, evaporador	12
9.	Cristalización, tachos	13
10.	Centrifugación, centrifugas.....	14
11.	Secado, secadora de azúcar.....	15
12.	Envasado de azúcar.....	16
13.	Diagrama de operaciones de proceso de fábrica	17
14.	Encuesta área de recuperación de sacarosa	21
15.	Diagrama de Pareto, área de recuperación de sacarosa	23
16.	Diagrama Ishikawa, exceso en consumo de agua en condensadores de tachos	24
17.	Encuesta sistema de enfriamiento	30
18.	Diagrama de Pareto, área de recuperación de sacarosa	32
19.	Diagrama Ishikawa, subutilización de las capacidades de los equipos de enfriamiento	33
20.	Cronograma de montaje.....	36
21.	Descarga de materiales de torre de enfriamiento	38

22.	Estructura de torre de enfriamiento.....	39
23.	Montaje de equipo mecánico	40
24.	Esquema de condensador barométrico	45
25.	Cantidad de agua y vapor, condensador barométrico	47
26.	Presión en condensador 1	58
27.	Esquema de torre de enfriamiento de flujo cruzado.....	64
28.	Flujo de efectivo, situación actual	104
29.	Flujo de efectivo, situación propuesta.....	105
30.	Flujo de efectivo, manteniendo pileta de enfriamiento	105
31.	Manual de inspección y mantenimiento correctivo para estructura y equipos de torre de enfriamiento.....	109
32.	Encuesta área de fabricación	116
33.	Diagrama de pareto, área de fabricación.....	118
34.	Diagrama Ishikawa, consumo de agua en fabricación.....	119
35.	Formato de encuesta	123
36.	Frecuencia de uso de inodoros en oficinas.....	124
37.	Conocimiento de inodoros de doble descarga en oficinas.....	124
38.	Frecuencia de uso de inodoros en área de fabricación	125
39.	Conocimiento de inodoros de doble descarga en fabricación.....	126
40.	Consumo de agua en sanitarios, área de fabricación	128
41.	Esquema de arreglo para ahorro de agua	129
42.	Formato de cartel, modo de uso de descargas dobles	130
43.	Encuesta necesidad de capacitación sistema de agua.....	133
44.	Conocimientos actuales	135
45.	Diagrama de Pareto, capacitación de sistema de aguas industriales de fábrica.....	136
46.	Diagrama Ishikawa, necesidad de capacitación	137
47.	Cronograma de actividades, necesidad de capacitación	139
48.	Listado de preguntas para comprobación de aprendizaje	140

49.	Resultados de prueba, diagnóstico, corrección y prevención de anomalías en torre de enfriamiento.....	141
50.	Formato de prueba de comprobación de aprendizaje	142
51.	Resultados de prueba, conversión de unidades de medida.....	143

TABLAS

I.	Datos tabulados, área de recuperación de sacarosa	22
II.	Datos operativos sistema de condensación, situación actual	26
III.	Flujo másico de vapor vegetal extraído en tachos	28
IV.	Datos tabulados de encuesta, aguas industriales de fábrica	31
V.	Datos operativos del sistema de aguas industriales de fábrica, situación actual	34
VI.	Desempeño de torre de enfriamiento de 24 000 GPM.....	42
VII.	Datos de diseño de torre de enfriamiento de 24 000 GPM	43
VIII.	Datos de vapor para cálculos, situación actual	49
IX.	Condensadores, situación actual	51
X.	Datos de agua para cálculos, situación propuesta en condensadores.....	52
XI.	Propiedades de agua saturada	53
XII.	Propiedades de líquidos, sólidos y alimentos comunes	55
XIII.	Consumo de agua de inyección, situación actual	60
XIV.	Consumo de agua de inyección, situación propuesta.	61
XV.	Datos de agua para cálculos, situación actual en torre de enfriamiento	63
XVI.	Datos de agua para cálculos, situación propuesta en torre de enfriamiento	63
XVII.	Temperatura de bulbo seco, torre de enfriamiento	68
XVIII.	Temperatura de salida del aire, torre de enfriamiento.....	69

XIX.	Propiedades atmosféricas	70
XX.	Presión de vapor saturado del aire	72
XXI.	Humedad específica del aire	73
XXII.	Calor específico del aire	74
XXIII.	Calor específico a presión constante del aire	75
XXIV.	Entalpía de vapor saturado del aire	76
XXV.	Entalpía de vapor saturado del aire, torre de enfriamiento	77
XXVI.	Entalpía específica del aire, torre de enfriamiento	78
XXVII.	Entalpía específica del agua, torre de enfriamiento	80
XXVIII.	Flujo másico del aire, torre de enfriamiento	81
XXIX.	Flujo másico del agua de relleno, torre de enfriamiento	82
XXX.	Datos de agua para cálculos, eficiencia térmica.....	83
XXXI.	Eficiencia térmica, torre de enfriamiento.....	84
XXXII.	Flujo de agua y eficiencia térmica, torre de enfriamiento.....	85
XXXIII.	Propiedades físicas del agua.....	87
XXXIV.	Consumo de agua en zafra, condensadores y relleno de torre de enfriamiento.....	88
XXXV.	Parámetros de operación actuales y propuestos, agua del sistema de condensación.....	90
XXXVI.	Parámetros de operación, vapor a condensar.....	91
XXXVII.	Parámetros de operación actuales y propuestos, sistema de enfriamiento.....	92
XXXVIII.	Catalogo de medidor de caudal electromagnético	94
XXXIX.	Gasto de operación por zafra de pileta de enfriamiento	97
XL.	Gastos de implementación de torre de enfriamiento.....	98
XLI.	Gastos de operación en zafra de torre de enfriamiento, situación actual.....	100
XLII.	Gastos de operación por zafra de torre de enfriamiento, situación propuesta.....	101

XLIII.	Tasa libre de riesgos	102
XLIV.	Rentabilidad esperada del mercado.....	103
XLV.	Coeficiente beta de la industria	103
XLVI.	Flujo de efectivo, factor de interés compuesto al 14 %	106
XLVII.	Valor presente neto, situación actual	107
XLVIII.	Valor presente neto, situación propuesta	107
XLIX.	Valor presente neto, manteniendo pileta de enfriamiento	108
L.	Datos tabulados de encuesta, área de fabricación	117
LI.	Tamaño de población, área de fabricación	120
LII.	Tamaño de muestra, área de fabricación.....	122
LIII.	Datos tabulados de la encuesta	122
LIV.	Consumo de agua en sanitarios, actual	127
LV.	Consumo de agua en sanitarios, propuesta.....	131
LVI.	Costo de implementación, propuesta de reducción de consumo de agua.....	132
LVII.	Capacitación sistema de aguas industriales de fábrica.....	134
LVIII.	Planificación de capacitaciones	138

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
HP	Caballos de potencia
Cp	Calor específico a presión constante
Q	Caudal
β	Coefficiente beta de la industrial
q	Complemento de la prevalencia esperada
y ₀	Componente en eje de ordenadas referencia inferior
y ₁	Componente en eje de ordenadas referencia superior
x ₀	Componente en eje de abscisas referencia inferior
x ₁	Componente en eje de abscisas referencia superior
ρ	Densidad
η	Eficiencia térmica
h _v	Entalpía específica de vapor
h _g	Entalpía específica de vapor saturado
h ₃	Entalpía específica de agua caliente
h ₄	Entalpía específica de agua fría
h ₂	Entalpía específica del aire de salida
h ₁	Entalpía específica del aire de entrada
i	Error esperado
\dot{m}	Flujo másico
\dot{m}_w	Flujo másico de agua
\dot{m}_3	Flujo másico de agua caliente
\dot{m}_{relleno}	Flujo másico de agua de relleno
\dot{m}_4	Flujo másico de agua fría

\dot{m}_a	Flujo másico de aire
\dot{m}_v	Flujo másico de vapor
GPM	Galones por minuto
°C	Grados Celsius
°F	Grados Fahrenheit
K	Grados Kelvin
ω_2	Humedad específica del aire a la salida
ω_1	Humedad específica del aire de entrada
ϕ	Humedad relativa
Kg/Kg	Kilogramos partido kilogramo
KgH₂O/Kg_{aire}	Kilogramos de agua partido kilogramos de aire
KgH₂O/KgH₂O	Kilogramo de agua partido kilogramo de agua
Kg/Hr	Kilogramo por hora
KJ/Kg	Kilojoule partido kilogramo
%	Porcentaje
P	Presión atmosférica
P_g	Presión de vapor saturado
p	Prevalencia esperada del parámetro evaluado
“Hg	Pulgadas de mercurio
Q	Quetzales, moneda de Guatemala
RE	Relación entre flujo de agua y vapor en condensador
rm	Rentabilidad esperada del mercado
Ks	Rentabilidad exigida a la acción
n	Tamaño de muestra
N	Tamaño de población
rf	Tasa libre de riesgo
T	Temperatura
t_i	Temperatura de agua de inyección
t_{wb}	Temperatura de bulbo húmedo

t_o	Temperatura de salida de condensados
y	Valor a interpolar en eje de ordenadas
x	Valor conocido en eje de abscisas
Z	Valor correspondiente a la distribución de Gauss

GLOSARIO

Alcalización	Etapa del proceso de purificación del jugo de azúcar en la cual se introduce cal al jugo.
Balance	Derivación matemática de la “Ley de la conservación de la energía” que es aplicada para conocer la cantidad de masa y energía que es intercambiada y acumulada en un sistema.
Color	Índice de atenuación, determinado por absorción de luz bajo condiciones definidas.
Condensador	Intercambiador de calor cuya función es propiciar el cambio de fase de gas a líquido de un fluido.
Cristalización	Nucleación y crecimiento de los cristales.
Entalpía	Propiedad de las sustancias que denota su capacidad de transferir su energía.
Evaporador	Intercambiador de calor empleado en el procesamiento de jugo de azúcar que evapora parte del agua contenida en el jugo para generar cierto grado de concentración.

Humedad específica	Masa de vapor de agua presente en una unidad de masa de aire seco.
Humedad relativa	Relación porcentual que existe entre la cantidad en masa de agua que contiene una unidad de masa de aire seco respecto de la cantidad máxima de masa de agua que puede contener la misma unidad de masa de aire seco, bajo iguales condiciones.
Incondensable	Sustancia que bajo condiciones de presión y temperatura determinadas no es posible encontrarla en estado líquido o sólido.
Ishikawa	Diagrama o esquema que relaciona las múltiples causas y efectos de las variables en un proceso.
Parámetro	Dato orientativo empleado para evaluar o valorar cierta situación, representa un valor numérico o dato fijo que se considera en el análisis de una cuestión.
Sacarosa	Compuesto químico puro $C_{12}H_{22}O_{11}$ que es conocido como azúcar blanco.
Sandblasting	Tratamiento de superficies mediante la remoción de cierto porcentaje de su capa superior, empleando un flujo a alta presión de abrasivos granulares, comúnmente arena.

Sistema	Conjunto de elementos interrelacionados que interactúan entre sí.
Sulfitación	Introducción de dióxido de azufre en el jugo o licor de azúcar.
Tacho	Intercambiador de calor en el cual ocurre la cristalización de la sacarosa por la sobresaturación del licor o miel introducida.
Variable	Propiedad que puede fluctuar a través del tiempo o de un individuo a otro y cuya variación es susceptible a adoptar diferentes valores, los cuales pueden ser observados o medidos.

RESUMEN

El rediseño de los parámetros de operación referentes a las temperaturas y flujos de agua de entrada y salida de los sistemas de condensación y enfriamiento del sistema de aguas industriales de Ingenio La Unión, se realizaron en el siguiente trabajo de investigación; los mismos tienen como finalidad la reducción del uso de agua en el segmento del sistema de recirculación de agua al que pertenecen.

El primer capítulo es una descripción de la historia y parte del plan estratégico de Ingenio La Unión, además de los procesos que se llevan a cabo en el azúcar. El siguiente capítulo es la esencia del trabajo de investigación en el cual se diagnostica la situación actual, se presenta la instalación de nuevos equipos y la metodología de cálculo que sustenta la propuesta de los parámetros de operación.

El tercer capítulo propone un plan de reducción de recursos del área de fabricación de Ingenio La Unión, específicamente de agua, en el cual se presenta el diagnóstico de la situación actual referente al consumo de este recurso y la propuesta de reducción de consumo. El último capítulo abarca lo referente a las capacitaciones realizadas al personal operativo que incorpora el sistema de aguas industriales de fábrica, las cuales tratan los temas de diagnóstico, corrección y prevención de anomalías en el funcionamiento de torres de enfriamiento, de la misma manera que las capacitaciones de conversión de unidades de medida para la mejora de las aptitudes del personal ante problemas cotidianos en su labor.

OBJETIVOS

General

Efectuar análisis termodinámicos de los sistemas de condensación y enfriamiento del Departamento de Aguas Industriales, para reducir el consumo de agua en los mismos y mejorar su operación en el proceso.

Específicos

1. Determinar las causas de variación en el desempeño de los sistemas de condensación que generan mayores consumos de agua.
2. Proponer parámetros de operación para los sistemas de condensación que optimicen su funcionamiento.
3. Evitar pérdidas de agua mediante la incorporación de sistemas de enfriamiento más eficientes (torre de enfriamiento).
4. Analizar térmicamente los sistemas de enfriamiento del Departamento de Aguas Industriales de fábrica, para mejorar su funcionamiento.
5. Calcular el ahorro económico que generará la incorporación de los parámetros de operación de condensadores y el incremento de eficiencia térmica de los sistemas de enfriamiento.

6. Proponer regulaciones del flujo de agua en los sistemas sanitarios para propiciar el ahorro de agua.
7. Capacitar a los operarios de las torres de enfriamiento la forma de diagnosticar anomalías en el funcionamiento de las mismas y las acciones necesarias para corregirlas, así como la forma de realizar conversiones de unidades de medida.

INTRODUCCIÓN

El proyecto desarrollado en el sistema de aguas industriales y el área de recuperación de sacarosa de Ingenio La Unión se enfoca en el rediseño de parámetros de temperaturas de operación de un segmento del sistema de recirculación de agua para la reducción del consumo de este recurso. Este se inicia con el diagnóstico de los segmentos mediante entrevistas y el análisis de los datos obtenidos, utilizando diagramas Ishikawa para la identificación de problemas y la toma acciones de solución.

El rediseño de los parámetros se propone con base en balanceos de energía realizados al sistema de recirculación de agua y de las nuevas capacidades debido a la reciente incorporación de mejores equipos de enfriamiento y tratamiento del agua. La temperatura del agua utilizada está relacionada con la cantidad de la misma, que es necesaria para desempeñar su función en los equipos de condensación y enfriamiento.

También se plantea la reducción del uso de agua para el área de fabricación, el cual fue propuesto para el mejor uso de este recurso en los servicios sanitarios. El último capítulo hace referencia a las capacitaciones impartidas al personal ligado a los sistemas de enfriamiento y tratamiento del agua para la mejora de su respuesta ante problemas de los equipos de enfriamiento, específicamente las torres de enfriamiento, como a la adaptación a los planes de dosificación mediante el desarrollo del manejo y conversión de diferentes unidades de medida para cumplir su labor.

1. GENERALIDADES INGENIO LA UNIÓN S. A.

1.1. Fundación e historia

“La historia empieza en 1903 con José García Paniagua, quien funda, en la sexta avenida y 13 calle zona 1 ciudad de Guatemala, el almacén de abarrotes S. García y Cía., Sucesores, que fue precursor de la empresa familiar La Unión-Los Tarros. Este negocio fue vendido en 1957, ya que don José deseaba dedicarse a la dirección de su finca.

Don José García, un próspero comerciante de abarrotes, pasaría de vender dulces y abarrotes a cultivar caña y a transformarla en miel, panela y azúcar. En abril de 1950, adquirió la Finca Los Tarros; esto representaba un gran reto para el trapiche.”¹

“Dado que en terrenos aledaños al Ingenio Los Tarros, no existían tierras para continuar ampliando este ingenio, a finales de los años sesenta se adquirieron fincas en zonas bajas de Santa Lucía Cotzumalguapa, en donde se vislumbraba mayor potencial de crecimiento, y se decidió fundar una nueva planta de producción de azúcar, a la que se llamó Ingenio La Unión.

El Ingenio La Unión comenzó operaciones el 20 de enero de 1970 en la Finca Belén, situada en Santa Lucía Cotzumalguapa, Escuintla y en su primera zafra se produjeron 160 mil quintales de azúcar.

En los años noventa se firmó un contrato con la empresa eléctrica de Guatemala para la venta de energía eléctrica y se empezó de esta forma a cogenerar, usando como combustible el bagazo de la caña de azúcar.

¹ Ingenio La Unión. Folleto de Inducción/Reinducción 2014-2015 proporcionado por Recursos Humanos de Fábrica, Ingenio La Unión, Escuintla, Guatemala.

En el año 2012 se finalizó la construcción de la refinería de azúcar, que con un silo en ambiente controlado, es el más moderno y equipado de toda Centro América. Actualmente, en Ingenio La Unión se trabaja fuertemente en la implementación de la mejora continua de todos los procesos y se adquirió el compromiso de que el azúcar sea elaborada con los más altos estándares de calidad e inocuidad.”²

1.2. Descripción

“Se trata de un grupo agroindustrial dedicado a la producción de caña de azúcar, azúcar, electricidad y mieles.

El grupo La Unión está integrado por los ingenios La Unión y Los Tarros, los cuales están ubicados en la costa sur de la República de Guatemala, en donde por casi 50 años han sido factor determinante en el desarrollo de esa región.

Estamos enfocados hacia la excelencia en nuestro trabajo, para obtener productos de calidad, que satisfagan las necesidades de nuestros clientes. Para ello contamos con un grupo humano comprometido y en continuo desarrollo, que en época de zafra alcanza a ser de más de 7,000 colaboradores.”³

1.3. Misión

“Somos una empresa agroindustrial comprometida a generar valor agregado para nuestros accionistas, colaboradores, clientes y demás grupos con quienes interactuamos. Creamos riqueza económica, social, laboral y ambiental para contribuir con un país más próspero y desarrollado”⁴

² Ingenio La Unión. Folleto de inducción/reinducción 2014-2015 proporcionado por Recursos Humanos de Fábrica Ingenio La Unión, Escuintla, Guatemala.

³ Ibid

⁴ Ibid

1.4. Visión

“Ser líderes en caña, azúcar y energía trabajando en unión con excelencia para trascender al desarrollo de un mundo mejor.”⁵

1.5. Valores

“Nuestros valores:

- Responsabilidad
- Integridad
- Respeto
- Compromiso
- Trabajo en equipo
- Superación”⁶

1.6. Ubicación

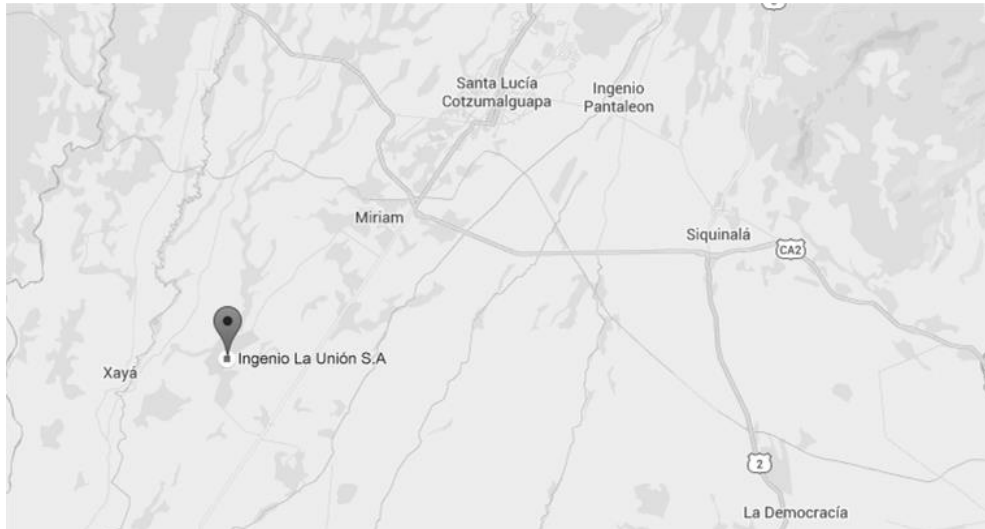
“Finca Belén km. 101.5 carretera a cerro Colorado, Santa Lucía Cotzumalguapa, Escuintla, Guatemala.”⁷ Ver figura 1.

⁵ Ingenio La Unión. Folleto de inducción/reinducción 2014-2015 proporcionado por Recursos Humanos de Fábrica Ingenio La Unión, Escuintla, Guatemala.

⁶ Ibid

⁷ Ibid

Figura 1. **Ubicación Ingenio La Unión**



Fuente: Google Maps. Consulta: febrero de 2015.

1.7. Estructura organizacional de la empresa

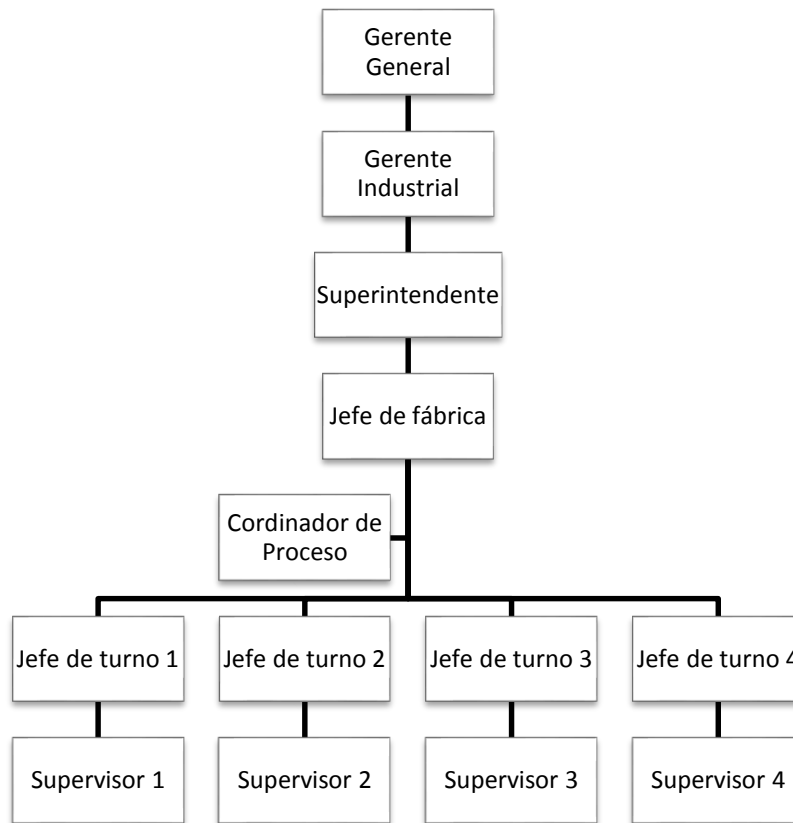
La estructura organizacional establece la forma en que se organizan, agrupan y dividen las actividades desarrolladas por cada miembro dentro de la organización para cumplir los objetivos deseados. Ingenio La Unión posee una estructura organizacional del tipo funcional, dado que se agrupa de acuerdo a las principales funciones o actividades que se realizan.

Este tipo estructura organizacional es ventajosa debido a que produce grandes volúmenes de poca variedad de productos ya estandarizados y cada grupo puede realizar su trabajo de forma eficiente. Esta forma de organización también conduce a una falta de comunicación entre los grupos funcionales dentro del ingenio, lo que hace la organización lenta e inflexible.

El organigrama representa gráficamente la distribución y jerarquía de los puestos dentro del área de fábrica. Por su presentación es de tipo vertical, mostrando la relación directa entre cada puesto, incrementado la jerarquía de estos a medida que se sube en el mismo, su naturaleza es de tipo microadministrativa, dado que presenta la conformación de solamente una de las Áreas de Ingenio la Unión, en este caso los puestos que están relacionados directamente con la fabricación de azúcar.

Este tipo de organigrama permite la rápida comunicación entre los subordinados y sus superiores, pero debido a que Ingenio La Unión trabaja las 24 horas del día, distribuye el trabajo en tres turnos de 8 horas cada uno; estos turnos son supervisados por los jefes de turno y los supervisores de cada uno de los mismos, estos rotan semanalmente en cada uno de los turnos y son relevados por un cuarto supervisor y jefe de turno para poder tomar una semana de descanso; esto dificulta la comunicación entre los jefes de diferentes turnos debido a que solo existe comunicación horizontal entre el turno que termina y el turno que comienza, por lo que se desconoce la información del turno restante. La figura 2 muestra el organigrama de fábrica.

Figura 2. **Organigrama de fábrica, Ingenio La Unión**



Fuente: elaboración propia, utilizando Microsoft Word.

1.8. Resumen del proceso de fabricación de azúcar

La fabricación de azúcar es un proceso que se ha sofisticado a lo larga de los años pero su esencia sigue siendo la misma; el jugo es extraído de la caña para ser limpiado y luego se retira el exceso de humedad para obtener el grano de azúcar que es empleado como materia prima para otras industrias o como ingrediente para las comidas en los hogares.

1.8.1. Extracción de jugo

La caña de azúcar utilizada en el proceso es cosechada manual y mecánicamente para ser transportada en camiones con jaulas que la suministran desde el campo hasta la planta de producción; la caña recibida es pesada y analizada para conocer su porcentaje de azúcar.

La caña es descargada en plataformas conocidas como mesas, aquí es conducida hacia los molinos donde previamente será cortada, desmenuzada y limpiada para poder extraer el jugo contenido en la fibra de la caña. Los molinos cuentan con una serie de masas cilíndricas acanaladas, usualmente cuatro, por las cuales es pasada la caña para romper la fibra y liberar el jugo, este jugo es recolectado y enviado a la siguiente etapa del proceso, la fibra o bagazo restante es utilizado como combustible para las calderas que se encargarán de proporcionar vapor para generar energía en los turbogeneradores y el restante del mismo ser utilizado en los procesos de fabrica. Ver figura 3.

Figura 3. **Extracción de jugo, molino para caña**



Fuente: Ingenio La Unión S. A.

1.8.2. Sulfitación

El jugo proveniente de los molinos pasa por torres de sulfatación las cuales mezclan a contracorriente el flujo de jugo con un flujo de anhídrido sulfuroso o dióxido de azufre resultante de la combustión del azufre con el aire en hornos rotativos de azufre. Esto ayuda a reducir la formación de color en el jugo, disminuye la viscosidad del jugo y ayuda a la generación de agentes precipitantes de impurezas que serán removidas más adelante en el proceso, vea figura 4.

Figura 4. **Sulfitación, torre de sulfatación**



Fuente: Ingenio La Unión S. A.

1.8.3. Alcalización

Se aplica cal al jugo para eliminar las impurezas insolubles y solubles del mismo, la cal es suministrada en forma de lechada la cual es una mezcla de cal y agua.

La lechada se aplica con base en las condiciones del jugo dado que neutraliza la acidez natural del jugo y genera sales insolubles que atrapan las impurezas y ayudan a su decantación o sedimentación en los procesos de clarificación posteriores. Ver figura 5.

Figura 5. **Alcalización, silo de cal**



Fuente: Ingenio La Unión S. A.

1.8.4. Clarificación

Se emplean clarificadores o decantadores para la remoción de las impurezas que han sido atrapadas por los elementos floculantes adicionados, estas impurezas insolubles se separan del jugo y por diferencia de densidades se decantan en el fondo del clarificador.

El jugo clarificado se extrae de la parte superior del clarificador y los lodos sedimentados se extraen de la parte inferior; este jugo clarificado será filtrado y calentado para seguir con el proceso y los lodos serán enviados hacia los filtros de cachaza. Ver figura 6.

Figura 6. **Clarificación, clarificador de bandeja**



Fuente: Ingenio La Unión S. A.

1.8.5. Filtración

El jugo clarificado es pasado por filtros que retiran las impurezas que no pudieron ser decantadas en el proceso anterior ya sea por que el jugo esté muy revuelto o por las impurezas de menor densidad que tienden a acumularse en la parte superior del jugo. Este jugo claro es enviado hacia los evaporadores.

Los lodos que se extraen del clarificador también pasan por un proceso de filtrado para recuperar parte del jugo que ha sido arrastrado junto con ellos; para ello se utilizan filtros rotativos o filtros de banda. El jugo extraído es retornado para ser reprocesado y la torta de lodo, denominada cachaza, es enviada al campo para ser utilizada como abono. Ver figura 7.

Figura 7. **Filtración, filtro banda**



Fuente: Ingenio La Unión S. A.

1.8.6. Evaporación

El jugo claro proveniente de la clarificación es concentrado en los evaporadores, estos son una serie de contenedores que cuentan con un área de intercambio de calor en su interior por el cual en una parte pasa vapor y por la otra el jugo.

En esta serie de evaporadores interconectados el jugo pasa a través de ellos para perder cerca del 75 por ciento de su contenido de agua, el cual es extraído en forma de vapor saturado por la parte superior del mismo. El producto obtenido al final de la evaporación es una miel viscosa conocida como meladura. Ver figura 8.

Figura 8. **Evaporación, evaporador**



Fuente: Ingenio La Unión S. A.

1.8.7. Cristalización

La meladura proveniente del proceso anterior es introducida a equipos evaporativos denominados tachos, en ellos se lleva a cabo la saturación de las mieles con que son alimentados para obtener los cristales de azúcar. Los tachos funcionan al vacío y se adiciona vapor para eliminar el restante de agua que contiene la meladura que ingresa al área de intercambio de calor, conocida como calandria.

El vacío en el tacho es generado por el condensador barométrico que condensa el agua que sale del tacho en estado de vapor saturado; estos también cuentan con bombas de vacío que extraen los gases incondensables que son arrastrados. La finalidad de esta etapa del proceso es la obtención de un cristal de tamaño adecuado, cantidad de cristal esperado y el agotamiento de la sacarosa que existe en la miel o licor. El producto obtenido es una mezcla de cristales de azúcar y miel, conocida como masa cocida. Ver figura 9.

Figura 9. Cristalización, tachos



Fuente: Ingenio La Unión S. A.

1.8.8. Centrifugación

En esta etapa se utilizan máquinas centrífugas discontinuas y continuas; aquí se lleva a cabo la separación del cristal de azúcar de las mieles; las centrífugas son máquinas que cuentan con una canasta en su interior que se hace rotar sobre su mismo eje por el accionamiento de motores eléctricos; esta canasta cuenta con mallas perforadas que atrapan el cristal de azúcar que es presionado contra ellas por la fuerza centrífuga resultante, la miel pasa a través de la malla para ser recolectada y enviada de regreso al proceso.

Los cristales atrapados son descargados y pasan a la siguiente etapa del proceso; ver figura 10.

Figura 10. **Centrifugación, centrifugas**



Fuente: Ingenio La Unión S. A.

1.8.9. Secado

El azúcar proveniente de las centrifugas contiene cierto grado de humedad que puede propiciar el atorrónamiento de grano o el crecimiento de microorganismos que degraden el producto.

Para el secado de azúcar se emplean tambores rotativos por los que el azúcar transita y mediante la incorporación de flujo de aire es posible la extracción del agua remanente en la superficie del grano; este tipo de secado propicia el arrastre de azúcar en forma de polvillo por lo que es necesario colocar separadores a la salida del flujo del aire. Ver figura 11.

Figura 11. **Secado, secadora de azúcar**



Fuente: Ingenio La Unión S. A.

1.8.10. Envasado

La azúcar al encontrarse en condiciones apropiadas después del acondicionamiento recibido es transportada y descargada hacia tolvas que se encuentran conectadas con las llenadoras; estas rellenan los sacos que luego serán cerrados mediante costuras realizadas por máquinas cocedoras industriales; ver figura 12.

Los sacos de azúcar con presentación de 50 kilogramos pasan por una etapa de pesado y se verifica que cumpla con los estándares de calidad para luego ser almacenado o transportado a su destino.

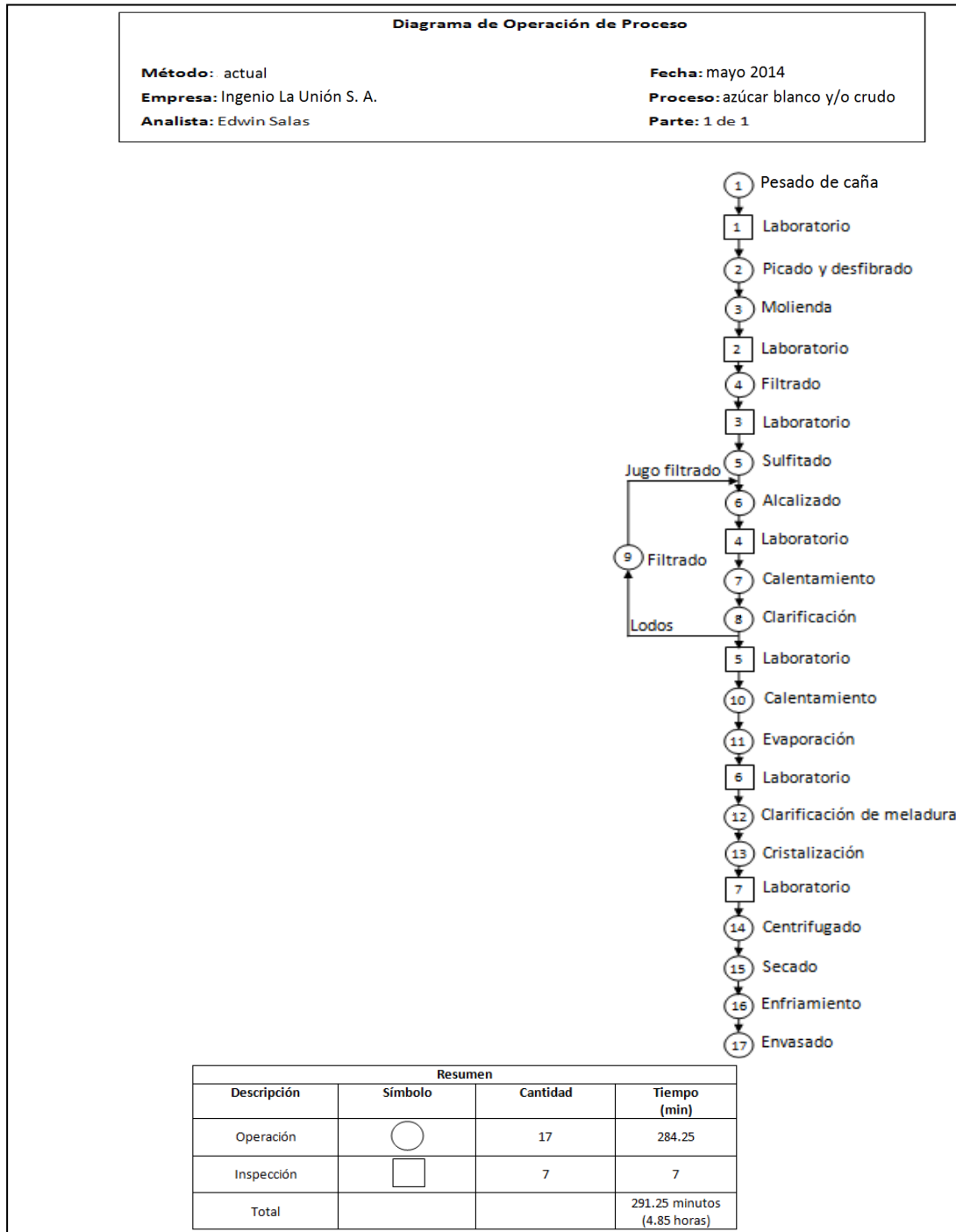
Figura 12. **Envasado de azúcar**



Fuente: Ingenio La Unión S. A.

La figura 13 muestra el diagrama de operaciones de proceso de fábrica; este es utilizado tanto en la fabricación de azúcar crudo como para el azúcar blanco, haciendo la aclaración que cada línea tiene sus propios equipos y que los flujos de estas dos calidades de azúcar no se mezclan.

Figura 13. Diagrama de operaciones de proceso de fábrica



Fuente: elaboración propia, utilizando Microsoft Word.

2. FASE DE SERVICIO TÉCNICO PROFESIONAL.

2.1. Diagnóstico de la situación actual

Los segmentos de estudio dentro de la fábrica son el área de recuperación de sacarosa y el sistema de aguas industriales de fábrica; esto debido a que están interrelacionados por el sistema de recirculación de agua que emplea Ingenio la Unión. El agua de enfriamiento que emplea el sistema de condensación proviene del sistema de aguas industriales; esta agua sigue un ciclo semicerrado en estos dos sistemas y para lograr el ahorro de este recurso es necesario analizar cómo trabajan dichos sistemas; el rediseño de los parámetros de operación de los mismos es una propuesta que ayudará a lograr este objetivo.

2.1.1. Sistema de condensación en área de recuperación de sacarosa

El área de recuperación de sacarosa es la encargada de cristalizar el azúcar presente en las mieles provenientes del área de evaporadores; para ello cuenta con dieciséis tachos individuales o *batch* y un tacho continuo; el análisis se enfocará a lo largo del proyecto únicamente en los tachos individuales.

Cada tacho cuenta con su propio condensador barométrico, el cual se encarga de condensar el vapor vegetal extraído de las masas y mieles que ingresan al cuerpo del tacho. Al perder humedad en forma de vapor vegetal, la masa se satura de sacarosa y se generan los granos de azúcar.


Los condensadores barométricos emplean un flujo de agua fría inyectado en la parte superior del condensador para lograr el cambio de fase gaseosa a fase líquida del vapor vegetal que ingresa en su parte inferior; este vapor se encuentra en estado saturado lo cual significa que al experimentar enfriamiento se condensara.

Estos sistemas de condensación inducen vacío dentro del cuerpo del tacho mediante la contracción experimentada por el vapor; al ser condensado, este cambio de volumen genera vacío que ayuda a evaporar con mayor facilidad el agua que contienen las masas. Se cuenta con bombas de vacío para la extracción de los gases incondensables que se acumulan dentro del cuerpo del condensador.

La cantidad de agua consumida por los condensadores depende de variables de operación tales como la cantidad de vapor a condensar, la temperatura del agua de inyección, temperatura del vapor y la temperatura de la mezcla de condensados que salen del mismo. El vacío que genera el condensador afecta los tiempos de residencia y las temperaturas dentro del tacho, por lo tanto se ha recurrido a un uso elevado de agua de inyección dentro del condensador para lograrlo.

Ingenio La Unión desea reducir la cantidad de agua que se emplea en los condensadores, por lo que se realizaron entrevistas al personal encargado del área de recuperación de sacarosa para conocer los problemas o anomalías experimentadas en los condensadores que propicien el consumo. La figura 14 presenta el formato de encuesta.

Figura 14. **Encuesta área de recuperación de sacarosa**



**INGENIO
LA UNIÓN**
Responsabilidad & Desarrollo

Encuesta

Objetivo:
Conocer los diferentes problemas existentes en el segmento del sistema de recirculación de agua que está relacionado al área de recuperación de sacarosa.

Instrucciones:
Responda de forma clara y sencilla. No coloque su nombre en esta encuesta, la información proporcionada será únicamente para fines de estudio.

1. ¿Qué problemas del sistema de recirculación de agua ocurientes en el Área de Recuperación de sacarosa considera que merecen ser tratados?
2. ¿Cuáles son las causas que propician el incremento del consumo de agua en los sistemas de condensación?

Fuente: elaboración propia.

Se entrevistó empleando la encuesta anterior a 22 operarios del área de recuperación de sacarosa, siendo ellos la totalidad de operarios de dicha área, con lo cual se obtuvo la información presentada en la tabla I.

Tabla I. Datos tabulados, área de recuperación de sacarosa

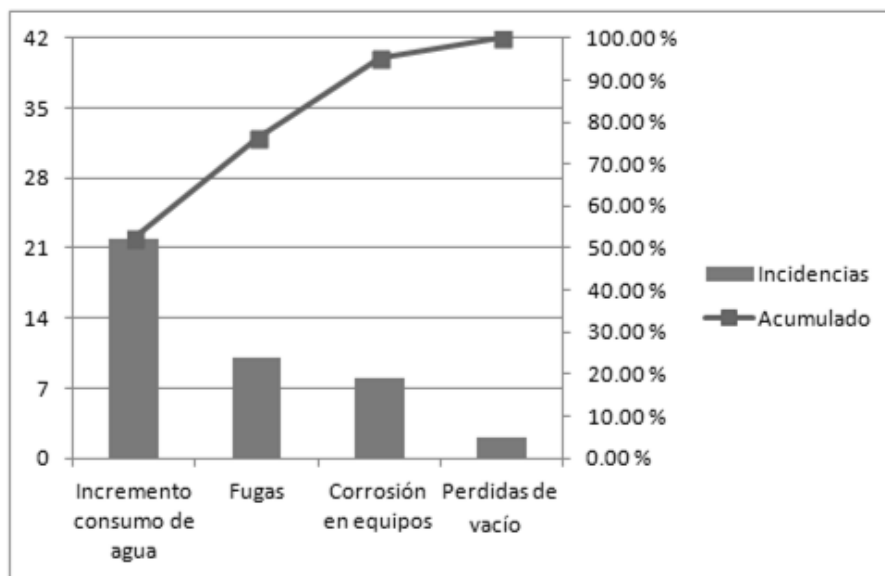
Pregunta 1			
Descripción	Histograma	Frecuencia	Frecuencia porcentual (%)
Incremento consumo de agua		22	52,38
Fugas		10	23,81
Pérdidas de vacío		2	4,76
Corrosión en equipos		8	19,05
Pregunta 2			
Descripción	Histograma	Frecuencia	Frecuencia porcentual (%)
Fallas en medición de presión		5	7,81
Falta de medidor de flujo para agua		3	4,69
Falta de lazo de control		2	3,13
Condensadores expuestos al clima		4	6,25
Enfriamiento excesivo de condensados		18	28,13
Perdida de vacío en bombas		3	4,69
Arrastres de sacarosa en el agua		8	12,50
Fugas por corrosión		10	15,63
Apertura excesiva de válvula de pie		2	3,13
Poca comunicación entre operarios		9	14,06

Fuente: elaboración propia.

Para observar de mejor manera los problemas considerados de mayor ocurrencia reportados por los operarios en el área de recuperación de sacarosa se presentan utilizando el diagrama de Pareto de la figura 15; en este se puede apreciar que el incremento en el consumo de agua es el problema más reportado en el cual su frecuencia es de 52,38 por ciento.

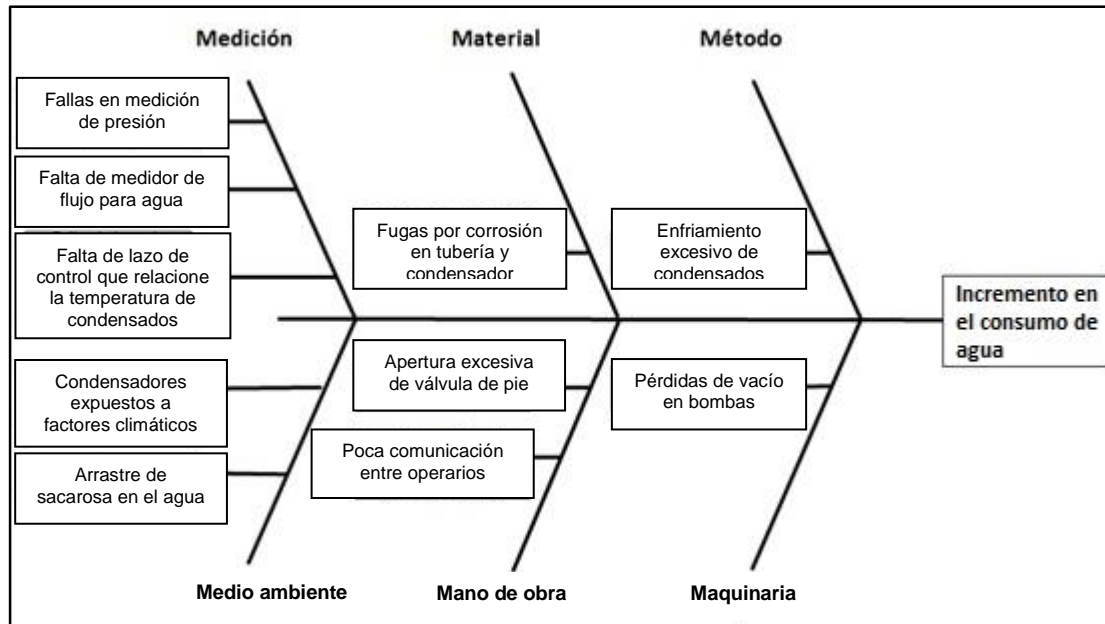
Con base en las observaciones y la colaboración del personal encargado, los cuales proporcionaron información mediante la encuesta anterior; las diversas causas fueron recopiladas y clasificadas en el diagrama presentado en la figura 16.

Figura 15. **Diagrama de Pareto, área de recuperación de sacarosa**



Fuente: elaboración propia.

Figura 16. Diagrama Ishikawa, exceso en consumo de agua en condensadores de tachos



Fuente: elaboración propia, utilizando Microsoft Word.

Debido a que el consumo de agua está ligado a las variables de operación mencionadas con anterioridad, la forma idónea para poder manipular estas variables es cambiar los parámetros de operación de este sistema.

Al analizar las causas presentadas en el diagrama anterior se puede observar que no se posee medidor de flujo de agua empleada en los condensadores; los trabajadores permiten el exceso en su consumo por el incremento en la apertura de las válvulas de alimentación; también es posible observar que se enfría demasiado el condensado de salida de los condensadores, lo que indica que se utiliza demasiada agua.

Otros factores son las pérdidas debido a fugas, pero estas son en su mayoría por el deterioro de los materiales debido a que el agua es un solvente universal; Ingenio La Unión ya cuenta con planes de mantenimiento correctivo y preventivo para dichas fugas.

Al rediseñar los parámetros de operación se podrán reducir algunas de las causas que generar el consumo excesivo de agua; esto es debido a que se empleará la cantidad de agua necesaria para condensar el vapor vegetal y generar el vacío requerido sin enfriar demasiado el condensado saliente; esto reduce el efecto corrosivo del agua que genera fugas en tuberías. Debido a que no se poseen valores de agua consumida por cada condensador es necesario calcularlos mediante balanceo de energía en el sistema de recirculación de agua, para ello son necesarios los valores de temperatura de entrada y salida del agua en el condensador de la mano con el flujo de vapor a condensar en estos equipos.

Para realizar el balanceo de energía que ayudará a establecer los parámetros de operación se cuenta con los datos de la tabla II; esta muestra el valor de las variables de operación actuales existentes en los condensadores de los tachos individuales.

El vacío relativo es la presión relativa dentro del tacho y fue obtenido mediante vacuómetros; la temperatura de colas es la de la mezcla de los condensados a la salida del condensador y la temperatura de cuerpo es la que pertenece al interior del cuerpo del tacho, la cual será considerada también como la correspondiente del vapor vegetal que sale del mismo; estas fueron medidas utilizando termopozos conectados a termómetros de carátula análogos y digitales.

Tabla II. **Datos operativos sistema de condensación, situación actual**

Núm. de tacho	Vacío relativo ("Hg)	Temperatura cola (°F)	Temperatura cuerpo (°F)
1	24,47	93,36	152,27
2	24,97	94,13	149,13
3	25,05	92,33	148,20
4	25,05	101,82	147,27
5	25,08	105,36	147,27
6	24,96	103,38	144,81
7	25,41	113,40	156,06
8	25,19	98,93	137,00
9	24,90	104,67	149,38
10	24,14	108,56	152,63
11	24,55	105,50	151,06
12	24,70	112,25	152,94
13	23,79	88,94	160,19
14	24,64	109,06	157,93
15	24,64	96,25	150,01
16	24,89	97,33	154,97

Fuente: Registros del Área de Recuperación de Sacarosa, Ingenio la Unión S. A.

Estos son los valores promedio registrados durante la zafra 2013-2014, los asesores externos de Ingenio La Unión les sugieren un valor promedio de vacío relativo entre 24 y 26 pulgada de mercurio (“Hg) por lo que los valores actuales en los condensadores del 1 al 16 están dentro del rango; por otro lado la temperatura promedio del cuerpo o temperatura de vapor vegetal no debe ser mayor a 225 grados Fahrenheit (°F) por la integridad de los tipos de empaques, sellos y equipos de medición colocados en el condensador, por lo que los valores registrados respetan este rango.

Respecto de los valores de temperatura de cola o de salida de condensados el sistema de aguas industriales de fábrica espera que esta agua caliente que se les suministra sea de por lo menos 117 grados Fahrenheit (°F) dado que los equipos de enfriamiento están diseñados para ingresar estos valores de temperatura, se observa que el valor de dicha temperatura está muy por debajo de este valor, hasta más de 20 grados bajo del mismo; esto indica que se está enfriando demasiado este condensado debido al exceso en el uso del agua de enfriamiento en el condensador del tacho.

La tabla III muestra la cantidad de vapor vegetal en kilogramos por hora que es generada en cada tacho y que ingresa a cada condensador, estos valores, como fue mencionado con anterioridad, servirán más adelante para realizar el balanceo de energía del condensador para obtener el valor del agua de enfriamiento consumida. La cantidad de vapor vegetal extraído de cada tacho varía dependiendo de la cantidad y tipo de miel o masa a cristalizar.

Tabla III. **Flujo másico de vapor vegetal extraído en tachos**

Núm. de tacho	Vapor (Kg/Hr)
1	2 963,34
2	5 926,28
3	8 541,54
4	7 300,80
5	7 300,80
6	7 299,48
7	5 545,14
8	4 679,27
9	4 679,27
10	4 680,56
11	10 350,13
12	10 614,43
13	10 111,80
14	3 266,37
15	3 512,56
16	5 704,20

Fuente: Ingenio La Unión. *Moliendo 18 000 TCD con refinería de 20 000 qq, Consultores de Ingenios Azucareros S. A. p. 15.*

Los valores de vapor presentados en la tabla III fueron obtenidos por medio de balances de sólidos realizados por asesores de ingenios azucareros; estos se calculan restando el flujo másico de materia de entrada al tacho menos el flujo másico de salida del mismo.

2.1.2. Sistema de enfriamiento de sistema de aguas industriales de fábrica

El sistema de aguas industriales de fábrica cuenta con cuatro torres de enfriamiento, teniendo dos torres de capacidad de 24 000, una de 15 000 y una 4 000 galones por minuto (GPM). También cuenta con otro equipo denominado pileta de enfriamiento la cual ha sido sustituida por una de las torres de enfriamiento de 24 000 galones por minuto (GPM).

Las torres de enfriamiento son sistemas semicerrados en los cuales el agua que ingresa es enfriada mediante enfriamiento evaporativo experimentado al interactuar con un flujo de aire atmosférico inducido a través de la torre; esto genera que parte del agua caliente sea evaporada y arrastrada por el aire; de esta forma ocurre una transferencia de calor entre el agua y el aire que se ve reflejado en la disminución de la temperatura del agua a la salida de la misma.

Estas torres están compuestas por estructuras de soporte de madera tratada, refuerzos de fibra de vidrio, enlaminado exterior, tanque de recepción de agua, sistemas de distribución de agua y ventiladores para la inducción del flujo de aire.

La pileta de enfriamiento es un cuerpo de agua similar a un pequeño estanque, en el cual el agua caliente es puesta en contacto con el aire mediante un ramal de aspersores que atomizan el flujo de agua caliente, el agua transmite parte de su calor al aire, a medida que desciende y es recolectada en la pileta. Este sistema no tiene ventiladores y trabaja con el flujo natural del aire, por lo que necesita mayor área de ubicación que la torre de enfriamiento; al estar descubierta al ambiente es más susceptible a contaminación y arrastres del agua por el aire.

El sistema de aguas industriales de fábrica recibe los condensados de salida de los condensadores para ser enfriados y tratados posteriormente y ser regresados a dichos equipos como agua de inyección o enfriamiento.

La temperatura de entrada a los equipos de enfriamiento está diseñada para que sea de por lo menos 117 grados Fahrenheit, pero los encargados del área se han percatado de que la temperatura del agua que entra a estos sistemas es inferior a la temperatura de diseño; esto quiere decir que se les ingresa agua muy fría y se subutilizan estos equipos de enfriamiento. Se entrevistó al personal encargado para conocer cuáles son las causas que propician que la temperatura del agua sea menor al valor de diseño y por ello se subutilicen las nuevas capacidades de enfriamiento de los equipos. La figura 17 muestra el formato de encuesta utilizado.

Figura 17. **Encuesta sistema de enfriamiento**

INGENIO
LA UNIÓN
Responsabilidad & Desarrollo

Encuesta

Objetivo:
Conocer los diferentes problemas existentes en el segmento del sistema de recirculación de agua que está relacionado al sistema de agua industriales de fábrica.

Instrucciones:
Responda de forma clara y sencilla. No coloque su nombre en esta encuesta, la información proporcionada será únicamente para fines de estudio.

1. ¿Qué problemas del sistema de recirculación de agua ocurrieron en el Sistema de Aguas Industriales considera que merecen ser tratados?
2. ¿Cuáles son las causas de que propician estos problemas?

Fuente: elaboración propia.

Se entrevistó empleando la encuesta anterior al personal del sistema de aguas industriales de fábrica, el cual cuenta con 8 personas; con esto se obtuvo la información presentada en la tabla IV.

Tabla IV. **Datos tabulados de encuesta, aguas industriales de fábrica**

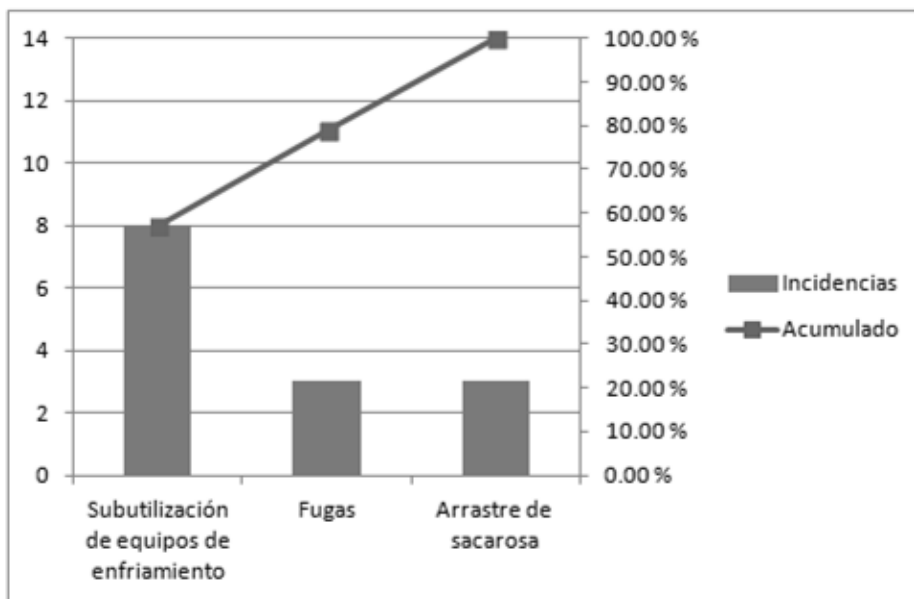
Pregunta 1			
Descripción	Histograma	Frecuencia	Frecuencia porcentual (%)
Fugas	III	3	21,43
Subutilización de equipos de enfriamiento	IIIIIIII	8	57,14
Arrastre de sacarosa	III	3	21,43
Pregunta 2			
Descripción	Histograma	Frecuencia	Frecuencia porcentual (%)
Fallas en medición de presión	IIIII	1	4,35
Fugas por corrosión	III	3	13,04
Alta humedad	II	2	8,70
Apertura excesiva de válvula de inyección	IIIII	4	17,39
Poca comunicación entre operarios	IIIIIIIIIIIIIIIIIIII	3	13,04
Uso excesivo de agua en condensadores	III	8	34,78
Perdida de vacío en equipos de condensación	IIIIIIII	2	8,70

Fuente: elaboración propia.

Para observar de mejor manera los problemas considerados de mayor ocurrencia reportados por los operarios, en el sistema de aguas industriales se presentan utilizando el diagrama de Pareto de la figura 18; en este se puede apreciar que la subutilización de equipos de enfriamiento es el problema más reportado en el cual su frecuencia porcentual es de 57,14.

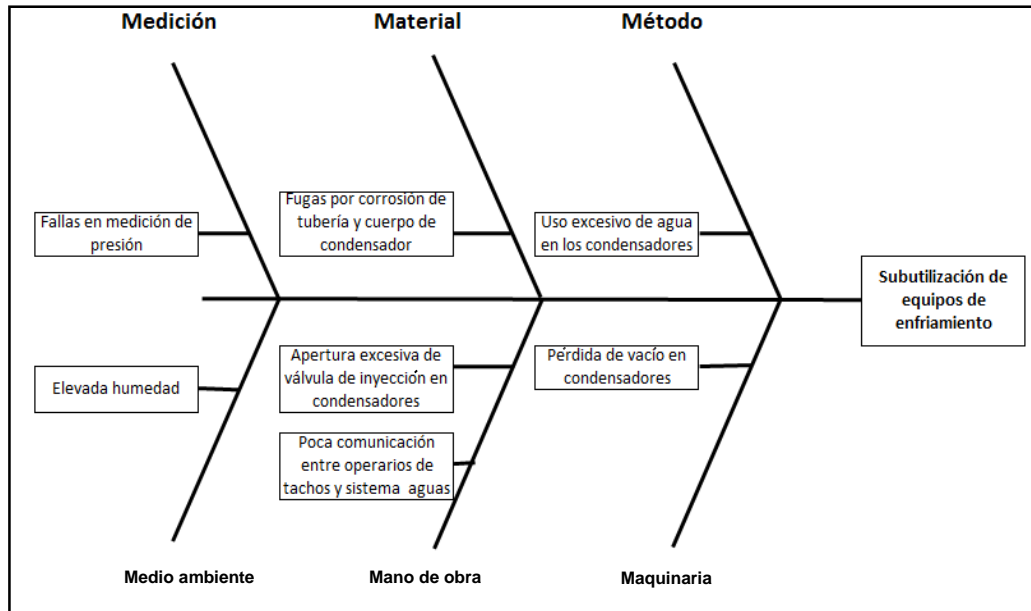
Con base en las observaciones y la colaboración del personal encargado, los cuales proporcionaron información mediante la encuesta anterior, las diversas causas fueron recopiladas y clasificadas en el diagrama presentado en la figura 19.

Figura 18. **Diagrama de Pareto, área de recuperación de sacarosa**



Fuente: elaboración propia.

Figura 19. **Diagrama Ishikawa, subutilización de las capacidades de los equipos de enfriamiento**



Fuente: elaboración propia.

Se puede observar con base en la figura 19 que la disminución en la temperatura que ingresa a los sistemas de enfriamiento está ligada al exceso en el uso de agua en los condensadores, ya sea esto por fallas en la medición de la presión del agua, pérdidas de vacío por fugas o apertura excesiva en válvula de inyección de agua por parte del personal que opera los tachos.

La tabla V muestra los valores referentes a la temperatura de entrada y de salida en la pileta de enfriamiento y la torre de enfriamiento de 24 000 galones por minuto, montada para sustituir a dicha pileta.

Tabla V. **Datos operativos del sistema de aguas industriales de fábrica, situación actual**

Pileta de enfriamiento		Nueva torre de enfriamiento	
Temperatura entrada (°F)	Temperatura salida (°F)	Temperatura entrada (°F)	Temperatura salida (°F)
108	87	106	82

Fuente: Registros del Sistema de Aguas Industriales de Fábrica, Ingenio la Unión S. A.

Estos son los valores promedio registrados durante el tiempo de operación de dichos equipos en el transcurso de la zafra 2013-2014. Como ya se mencionó los equipos de enfriamiento están diseñados para recibir agua caliente de por lo menos 117 grados Fahrenheit (°F) y la temperatura de mezcla de los condensados calientes que proporcionan los condensadores de los tachos (temperatura de entrada) estuvieron por debajo de este valor; esto indica que se subutilizaron estos equipos de enfriamiento; más adelante se mostrará como afecta esto a la eficiencia térmica de estos equipos.

2.2. Resumen de montaje de torre de enfriamiento

La pileta de enfriamiento existente ha sido sustituida por una torre de enfriamiento, se presenta a continuación en forma resumida las actividades de montaje e instalación de la misma. La torre de enfriamiento montada pertenece a la clasificación de torre de enfriamiento de flujo cruzado con tiro inducido; este tipo de torre posee ventiladores en la parte superior de la misma que inducen el flujo de aire que entra de forma cruzada a través de los costados de la torre.

Se eligió una torre de enfriamiento de tiro cruzado dado que el aire que entra a la misma lo hace por los costados, mejorando su contacto con el agua que ingresa en la parte superior de la torre y pasa en su interior para salir y ser regresada al sistema por medio de bombas centrifugas en su parte inferior, la torre es de serie 600 proporcionada por la empresa *The Marley Co*, las cuales son diseñadas en celdas que tienen una capacidad de 8 000 galones por minuto; Ingenio La Unión estima que requiere cerca de 20 000 galones por minuto, por lo que la torre de enfriamiento posee tres celdas que le dan una capacidad de 24 000 galones por minuto.

La torre es en su mayoría de madera tratada, debido a su fácil manejo, resistencia a la corrosión y precio menor en comparación con las torres fabricadas de fibra de vidrio. Esta configuración de torre es de las más populares para los sistemas de agua en los diferentes ingenios de Guatemala.

2.2.1. Consulta de manuales

Se realizó la consulta de los planos de montaje torre de enfriamiento modelo W658-4-3 y los detalle de juntas y uniones, en el cual se establece la configuración de la estructura de la torre de enfriamiento, haciendo referencia al código de piezas a incorporar en cada una de las secciones de la misma, así como el establecimiento del tipo y tamaño de conectores y tornillería para cada punto de acople. Con ello se logró comprender la constitución de los elementos de la torre de enfriamiento y establecer el cronograma de montaje de la misma, ver figura 20.

Figura 20. Cronograma de montaje

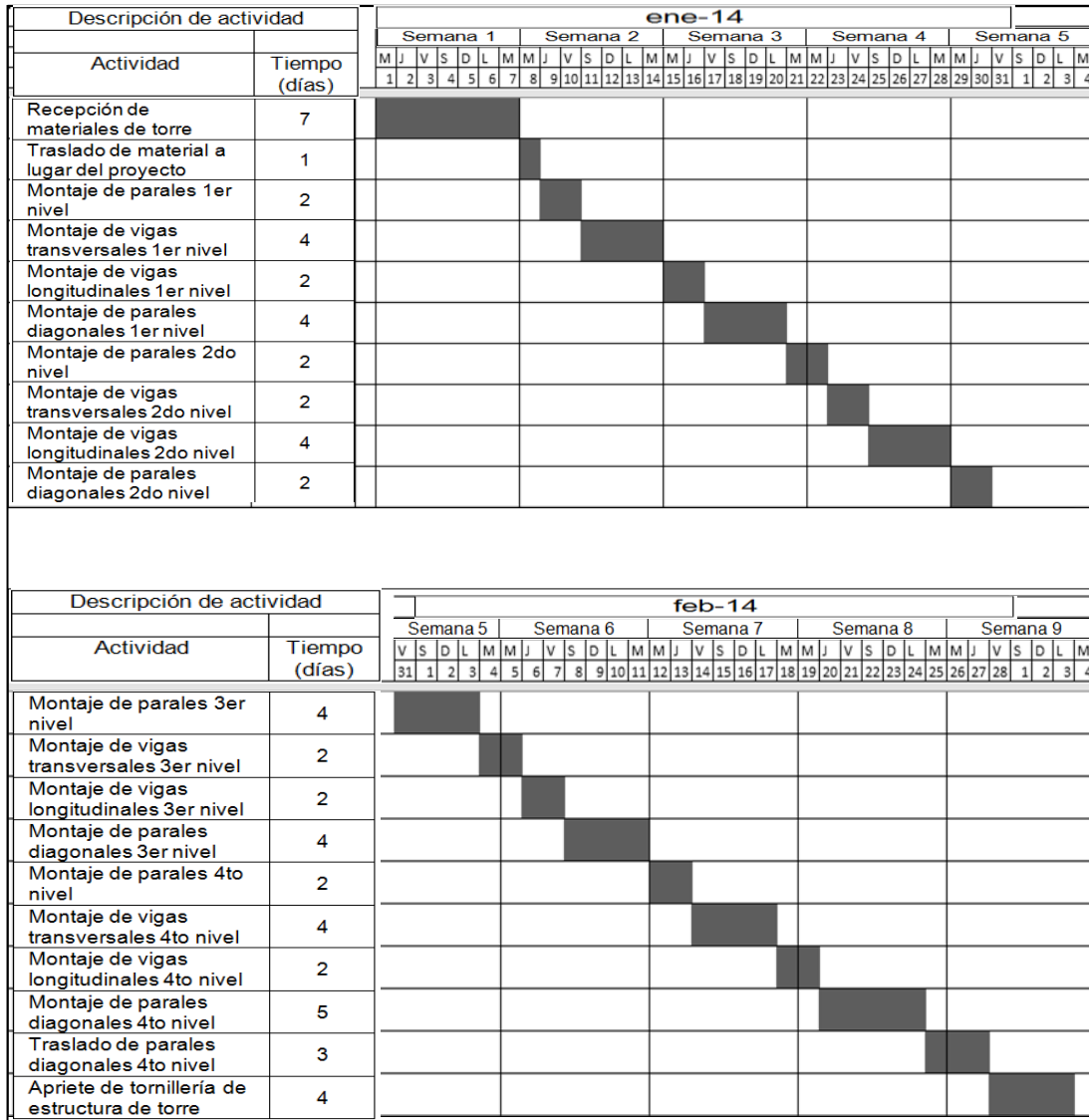


Figura 21. **Descarga de materiales de torre de enfriamiento**



Fuente: Ingenio La Unión S. A.

2.2.3. Armado de estructura

La estructura o cuerpo de soporte de la torre de enfriamiento está compuesta por 22 secciones transversales y 10 secciones longitudinales en forma de marcos cuadrados y triangulares para el sostenimiento del resto de los equipos; ver figura 22. El cuerpo de la torre se designó en cuatro niveles establecidos por las columnas de soporte unidas entre sí por vigas transversales y longitudinales en arreglos denominados coronas; cada nivel tiene un promedio de dos coronas y este arreglo se repite en las tres celdas en que se divide este tipo de torre de enfriamiento.

El cuerpo de la torre está compuesto de vigas de madera tratadas de abeto tipo Douglas, conectores de fibra de vidrio reforzado con poliéster, tornillería de acero inoxidable, relleno de PVC, láminas de asbesto y anclajes de hierro fundido galvanizados.

La metodología de montaje fue principiar el armado del nivel 1 y 2 de la celda 1 y 2, terminando con la celda 3 y el nivel 4 de las tres celdas.

Figura 22. **Estructura de torre de enfriamiento**



Fuente: Ingenio La Unión S. A.

2.2.4. Montaje de elementos mecánicos

El equipo mecánico es el conjunto de soportes mecánicos, motores, reductores y ventiladores que incorporan el sistema de flujo de aire inducido de la torre de enfriamiento. Se armaron y alinearon los sistemas de transmisión; se colocaron las 8 aspas de cada ventilador y se montó este arreglo sobre los soportes mecánicos. Cada una de las 3 celdas posee un ventilador de 22 pies de diámetro, motores eléctricos de 150 caballos de fuerza y reductores de radio de conversión de 11.8:1. Ver figura 23.

Figura 23. **Montaje de equipo mecánico**



Fuente: Ingenio La Unión S. A.

2.2.5. Actividades complementarias

La torre de enfriamiento posee un ramal de tubería de agua de entrada y de salida que debe ser soportada y anclada al suelo por medio de bases; estas bases consisten en pedestales de concreto armado que soportan el peso de las tuberías de admisión e inyección de agua que entra y sale de la torre, respectivamente; se propusieron 9 bases para la tubería de admisión y 8 bases para la tubería de inyección.

Dado que los diámetros de tubería deseados son de 38 y 32 pulgadas de diámetro es necesario rolar lámina para darle forma cilíndrica y unirla entre sí y a otras tuberías mediante soldadura.

Se emplea lámina de hierro negro de $\frac{1}{4}$ de pulgada de espesor, biselada a 45° y con separación de 5 mm. La tubería a emplear debe poseer un recubrimiento de pintura epóxica en la parte interior y un recubrimiento de pintura anticorrosiva en la parte superior. Para garantizar un buen acabado de la tubería y una prolongada vida útil es necesario retirar la capa superior del metal que ha ganado óxido; esto se realizó mediante la abrasión de esta capa utilizando un flujo de arena abrasiva impulsada a chorro sobre la superficie a limpiar, esto es conocido como *sandblasting*.

2.3. Metodología de cálculo

Para obtener el consumo óptimo de agua en condensadores y los parámetros de temperaturas de operación es necesaria la realización de balanceos de energía al sistema de recirculación de agua, conformado por los condensadores del área de recuperación de sacarosa y los equipos de enfriamiento del sistema de aguas industriales de fábrica.

2.3.1. Sistema de condensación

Para lograr una disminución en el consumo de agua de los condensadores es necesario analizar los valores de operación con los cuales laboran; dado que se trabajará de ahora en adelante con la torre de enfriamiento de 24 000 galones por minuto, la temperatura de agua de inyección a los condensadores será la temperatura de salida de la torre de enfriamiento y la de salida de la mezcla de condensados en los condensadores será la temperatura de entrada a la torre de enfriamiento.

Para establecer el parámetro de temperaturas de operación para el agua de entrada y condensados de salida en el condensador es necesario examinar el desempeño de la torre de enfriamiento debido a que está interconectada con los condensadores y la temperatura de agua de salida de la torre de enfriamiento será la temperatura de entrada del condensador y viceversa. *SPX Colling Technologies* como diseñador de las torres de enfriamiento vendidas por *The Marley Co.* proporciona los desempeños de esta torre bajo diferentes condiciones de operación como guía para futuras modificaciones realizadas por el usuario; como se mencionó en la sección 2.2. el flujo manejado es aproximadamente de 20 000 galones por minuto en este sistema.

Como se observa en la tabla VI al operar la torre de enfriamiento por debajo del 90 por ciento de su capacidad, lo que sería menor a 21 600 galones por minuto, es aplicable a los 20 000 galones por minuto usado en el sistema de recirculación, es posible lograr enfriamientos de hasta 34 grados Fahrenheit y con base en los datos de diseño de dicha torre presentados en la tabla VII se garantiza que la temperatura de salida de la torre de enfriamiento será de por lo menos 90 grados Fahrenheit, la cual sería también la temperatura de entrada del agua en los condensadores.

Tabla VI. **Desempeño de torre de enfriamiento de 24 000 GPM**

Design Flow	Flow	Range
90%	21600 GPM	34 °F
100%	24000 GPM	27 °F
110%	26400 GPM	21.6 °F

Fuente: Ingenio La Unión, SPX Colling Technologies. *Spray replacement cooling tower*. p. 3.

De esta manera utilizando los valores de diseño y operación calculados por SPX Colling Technologies para esta torre de enfriamiento, es posible establecer rápidamente como parámetro de temperatura de operación para la inyección o entrada de agua de enfriamiento al condensador la temperatura de 90 grados Fahrenheit.

Tabla VII. **Datos de diseño de torre de enfriamiento de 24 000 GPM**

Desing Conditions	
Tower Water Flow	24000 gpm
Hot Water Temperature	117.00 °F
Cold Water Temperature	90.00 °F
Wet-Bulb Temperature	80.00 °F
Relative Humidity	50 %
Total Dissolved Solids	0 ppm
Altitude	600 ft
Inlet P.D. Vel. Heads	0
Outlet P.D. Vel. Heads	0
Motor Output	143.6 BHp

Fuente: Ingenio La Unión, SPX Colling Technologies. *Spray replacement cooling tower*. p. 2.

Para obtener el parámetro de temperatura de salida del condensador es necesario recordar que este será igual a la temperatura de entrada de agua a la torre de enfriamiento, por lo tanto esta se obtiene al sumar el rango de enfriamiento de 34 grados Fahrenheit a los 90 grados Fahrenheit de temperatura de salida de la torre de enfriamiento, esta será de 124 grados Fahrenheit; más adelante se presentará el consumo de agua correspondiente para mantener los parámetros propuestos en comparación con el consumo de agua existente debido a los valores actuales y si estos serán capaces de cumplir con el requerimiento de vacío en cada tacho.

2.3.1.1. Balanceo de masa y energía

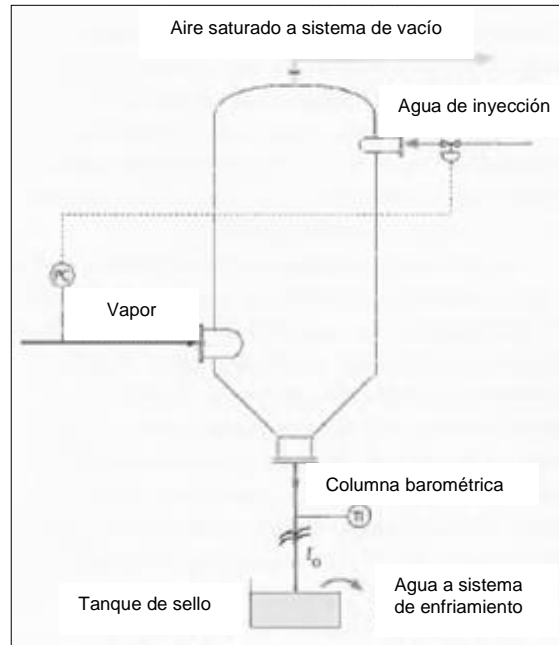
Para realizar un balanceo de masa y energía es necesario comprender, con base en la primera Ley de la Termodinámica, que no es posible crear o destruir la masa y la energía, solamente es posible transformar la misma a uno de estos dos estados.

De este modo se establece que los productos que ingresan a una operación saldrán de ella como otros productos y que un balanceo de masa no es más que una verificación cuantitativa de la igualdad de masa que entra como insumo y sale como productos y residuos.

De forma rápida y simple para el estudio de los condensadores barométricos se puede asumir que la entrada al sistema está conformada por el flujo másico de vapor a condensar y el flujo másico de agua de enfriamiento; de esta manera la salida del sistema sería la sumatoria de los dos flujos. Entre los elementos de salida del sistema es de mencionarse la presencia de los gases incondensables.

El condensador recibe el vapor vegetal proveniente de los equipos evaporativos; se inyecta agua fría para poder condensar dicho flujo de vapor y se extrae el flujo de gases incondensables. Al final se regresará al sistema la cantidad de vapor condensado más el agua fría empleada para condensarlo. Ver figura 24.

Figura 24. **Esquema de condensador barométrico**



Fuente: REIN, Peter. *Ingeniería de la caña de azúcar*. p. 370.

El balance de energía quedaría de la siguiente forma:

$$\dot{m}_v * h_v + \dot{m}_w * t_i * C_p = (\dot{m}_w + \dot{m}_v) * t_o * C_p$$

Donde:

\dot{m}_v = flujo másico de vapor (kg/h)

h_v = entalpía específica de vapor (KJ/Kg)

\dot{m}_w = flujo másico de agua (kg/h)

t_i = temperatura de flujo másico de agua de inyección (°C)

C_p = calor específico del agua a presión constante (KJ/Kg*°C)

t_o = temperatura de flujos másico de mezcla a la salida del condensador (°C)

Para este balanceo se considera que la presión dentro del condensador se mantiene constante y que el flujo de gases incondensables es despreciable y será extraído por completo por la bomba de vacío del condensador.

La temperatura a la cual ingresa el agua al condensador tiene efectos significativos en él, si se reescribe la expresión del balance de energía para el condensador de forma que se encuentre la relación de flujos máscicos de vapor y agua se tendría:

$$\frac{\dot{m}_w}{\dot{m}_v} = \frac{h_v - (t_o * C_p)}{C_p * (t_o - t_i)}$$

Al fijarse en esta expresión, considerando un vapor a condensar constante, se puede observar que si incrementa el tamaño del denominador se podrá reducir la cantidad de agua a inyectar al condensador. Esto se lograría disminuyendo la temperatura de flujo máscico de agua (t_i).

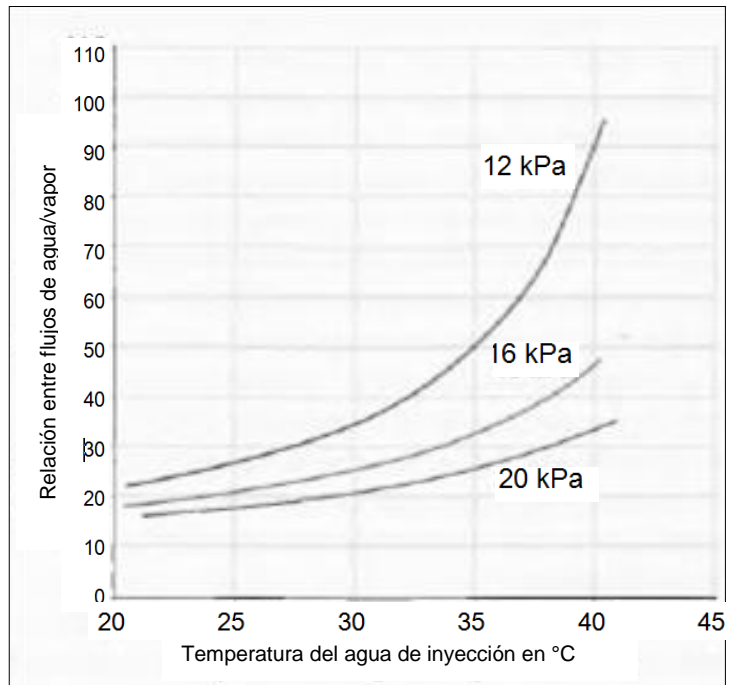
Al reescribir la ecuación anterior, para hallar el valor del flujo máscico de agua necesaria, esta quedaría de la siguiente manera.

$$\dot{m}_w = \dot{m}_v * \frac{h_v - (t_o * C_p)}{C_p * (t_o - t_i)}$$

El vacío que se genera dentro del condensador es un factor muy importante, dado que no solo se busca que el condensador pueda pasar de estado gaseoso a líquido el vapor saturado que a él ingresa, sino que a su vez se desea una presión de trabajo que facilite la evaporación del agua de los jugos o mieles dentro de los equipos de evaporación, dado que la temperatura de ebullición del agua es directamente proporcional a la presión.

La figura 25 presenta el gráficas que relacionan las temperaturas dentro del condensador, la presión y los flujos máxicos de agua y vapor. Esta gráfica será empleada más adelante para verificar si los flujos de agua calculados a las temperaturas propuestas serán capaces de proporcionar la presión requerida en los equipos de evapo-cristalización.

Figura 25. **Cantidad de agua y vapor, condensador barométrico**



Fuente: REIN, Peter. *Ingeniería de la caña de azúcar*. p. 371.

2.3.1.2. Recolección de datos

Se emplearon los datos de operación promedio registrados en el Área de Recuperación de Sacarosa, los valores de evaporación en tachos proporcionados por la empresa de Consultores de Ingenios Azucareros S. A. (CIASA) y los datos de diseño del informe de *SPX Colling Technologies, Spray Pond Replacement Cooling Tower*, Ingenio La Unión.

Para realizar el balanceo de energía en cada condensador y así conocer el consumo de agua de los mismos debido a los parámetros de temperatura es necesario conocer el flujo de entrada y salida del condensador y las condiciones de temperatura en que estos ocurren. A continuación se presentan los datos considerados necesarios para el balance de energía.

La tabla VIII muestra el flujo másicos y la temperatura del vapor vegetal a ser condensado; estos valores representan cuánto vapor entra a cada condensador y la temperatura con la cual lo hace, por ejemplo el condensador número 1 recibe para condensar un flujo másico de vapor de 2 963,34 kilogramos por hora a una temperatura de 152,27 grados Fahrenheit o 66,81 grados Celsius.

Los datos de flujos másicos de vapor fueron proporcionados por la empresa de Consultores de Ingenios Azucareros S. A. y las temperaturas de vapor se obtuvieron mediante medidores de temperatura análogos y digitales incorporados al cuerpo de los tachos.

Tabla VIII. **Datos de vapor para cálculos, situación actual**

Condensador	Vapor	Temperatura de vapor	Temperatura de vapor
	Kg/Hr	°F	°C
1	2 963,34	152,27	66,81
2	5 926,28	149,13	65,07
3	8 541,54	147,27	64,04
4	7 300,80	147,27	64,04
5	7 300,80	147,27	64,04
6	7 299,48	144,81	62,67
7	5 545,14	156,06	68,92
8	4 679,27	137,00	58,33
9	4 679,27	149,38	65,21
10	4 680,56	152,63	67,01
11	10 350,13	151,06	66,15
12	10 614,43	152,94	67,19
13	10 111,80	160,19	71,22
14	3 266,37	157,93	69,96
15	3 512,56	150,01	65,56
16	5 704,20	154,97	68,32

Fuente: elaboración propia, con base en *Registros de recuperación de sacarosa e investigación moliendo 18 000 TCD con refinera de 20 000 QQ, produciendo azúcar refinado y blanco cristal*, Consultores de Ingenios Azucareros S. A. p. 15.

La tabla IX y la tabla X presentan respectivamente los valores de temperatura de agua de inyección y condensados de salida para la situación actual y la situación propuesta. Estos datos serán empleados para realizar los balanceos de energía para los condensadores.

La temperatura de condensados de salida presentada es la temperatura del agua de salida de cada condensador; esta fue obtenida utilizando medidores de temperatura análogos y digitales instalados en la cola o columna barométrica de cada uno de ellos, las temperaturas son presentadas en grados Fahrenheit y Celsius.

La temperatura de agua de inyección presentada es la temperatura de agua de entrada a cada condensador; esta fue obtenida utilizando medidores de temperatura análogos instalados en la tubería de agua de inyección de la torre de enfriamiento debido a que esta es empleada por todos los condensadores, de igual manera que para la temperatura de condensados de salida esta es presentada en grados Fahrenheit y Celsius.

De modo que si se desea saber el valor de la temperatura del agua de salida y entrada del condensador número 1 para la situación actual se emplearía la tabla X, siendo estas respectivamente de 93,34 grados Fahrenheit o 34,09 grados Celsius y 82,00 grados Fahrenheit o 27,78 grados Celsius. Si se desea obtener estos mismos valores para el mismo condensador pero en la situación propuesta se emplea la tabla X, siendo estos para la temperatura de agua de salida 124,00 grados Fahrenheit o 51,11 grados Celsius, y para la temperatura de agua de entrada 90,00 grados Fahrenheit o 32,22 grados Celsius.

Tabla IX. **Condensadores, situación actual**

Condensador	Temperatura condensados de salida	Temperatura condensados de salida	Temperatura agua inyección	Temperatura agua inyección
Núm.	°F	°C	°F	°C
1	93,36	34,09	82,00	27,78
2	94,13	34,52	82,00	27,78
3	92,33	33,52	82,00	27,78
4	101,82	38,79	82,00	27,78
5	105,36	40,76	82,00	27,78
6	103,38	39,65	82,00	27,78
7	113,40	45,22	82,00	27,78
8	98,93	37,19	82,00	27,78
9	104,67	40,37	82,00	27,78
10	108,56	42,53	82,00	27,78
11	105,50	40,83	82,00	27,78
12	112,25	44,58	82,00	27,78
13	88,94	31,63	82,00	27,78
14	109,06	42,81	82,00	27,78
15	96,25	35,69	82,00	27,78
16	97,33	36,30	82,00	27,78

Fuente: elaboración propia, con base en Registro de área de recuperación de sacarosa, Ingenio La Unión S. A.

Tabla X. **Datos de agua para cálculos, situación propuesta en condensadores**

Condensador	Temperatura condensados de salida	Temperatura condensados de salida	Temperatura agua inyección	Temperatura agua inyección
Núm.	°F	°C	°F	°C
1	124,00	51,11	90,00	32,22
2	124,00	51,11	90,00	32,22
3	124,00	51,11	90,00	32,22
4	124,00	51,11	90,00	32,22
5	124,00	51,11	90,00	32,22
6	124,00	51,11	90,00	32,22
7	124,00	51,11	90,00	32,22
8	124,00	51,11	90,00	32,22
9	124,00	51,11	90,00	32,22
10	124,00	51,11	90,00	32,22
11	124,00	51,11	90,00	32,22
12	124,00	51,11	90,00	32,22
13	124,00	51,11	90,00	32,22
14	124,00	51,11	90,00	32,22
15	124,00	51,11	90,00	32,22
16	124,00	51,11	90,00	32,22

Fuente: elaboración propia, con base en informe de *SPX Colling Technologies, Spray pond replacement cooling tower.*

2.3.1.3. Cálculo de consumo de agua

Se cuenta con los valores de flujo de vapor así como de flujo agua a la entrada y salida del condensador siendo necesario obtener la entalpía específica del vapor y el calor específico del agua a presión constante para obtener el consumo de agua. A continuación se presenta el cálculo del flujo másico de agua necesario en el condensador número 1. La entalpía específica del vapor en el condensador número 1 es posible obtenerla mediante las tablas de propiedades de agua saturada. Ver tabla XI.

Tabla XI. Propiedades de agua saturada

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, $kJ/kg \cdot K$		
		Liq. sat., v_f	Vapor sat., v_g	Liq. sat., u_f	Evap., u_{fg}	Vapor sat., u_g	Liq. sat., h_f	Evap., h_{fg}	Vapor sat., h_g	Liq. 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
55	15.763	0.001015	9.5639	230.24	2219.1	2449.3	230.26	2369.8	2600.1	0.7680	7.2218	7.9898
60	19.947	0.001017	7.6670	251.16	2204.7	2455.9	251.18	2357.7	2608.8	0.8313	7.0769	7.9082
65	25.043	0.001020	6.1935	272.09	2190.3	2462.4	272.12	2345.4	2617.5	0.8937	6.9360	7.8296
70	31.202	0.001023	5.0396	293.04	2175.8	2468.9	293.07	2333.0	2626.1	0.9551	6.7989	7.7540

Fuente: BOLES, Michales; CENGEL, Yunes. *Termodinámica*. p. 914

La temperatura de vapor del condensador número 1 según la tabla VIII es de 66,81 grados Celsius, considerando este vapor como saturado se busca su entalpía específica a esta temperatura en la tabla XI siendo necesario interpolar entre los valores de temperatura de 65 y 70 grados Celsius los cuales poseen entalpías de 2 617,5 y 2 626,1 kilojoules sobre kilogramo (KJ/Kg).

$$y = y_1 - (y_1 - y_0) * \frac{x_1 - x}{x_1 - x_0}$$

Donde:

y = valor a interpolar en eje de ordenadas

x = valor conocido en eje de abscisas

x₀ = componente en eje de abscisas del punto de referencia inferior

x₁ = componente en eje de abscisas del punto de referencia superior

y₀ = componente en eje de ordenadas del punto de referencia inferior

y₁ = componente en eje de ordenadas del punto de referencia superior

Sustituyendo con los valores encontrados en la tabla XI se puede encontrar la entalpía para el vapor saturado a 66,81 grados Celsius.

$$y = 2\,617,3 - (2\,617,3 - 2\,626,1) * \frac{65 - 66,81}{65 - 70} = 2\,620,62 \text{ KJ/Kg}$$

El calor específico del agua a presión constante en el condensador número 1, es posible obtenerla mediante la tabla XII. El valor de calor específico a presión constante para el agua de temperaturas entre 25 y 50 grados Celsius es de 4,18 kilojoules sobre kilogramo por unidad de temperatura.

Tabla XII. **Propiedades de líquidos, sólidos y alimentos comunes**

Propiedades de líquidos, sólidos y alimentos comunes							
a) Líquidos							
Sustancia	Datos de ebullición a 1 atm		Datos de congelación		Propiedades de líquidos		
	Punto de ebullición normal, °C	Calor latente de vaporización h_{fg} , kJ/kg	Punto de congelación, °C	Calor latente de fusión h_{if} , kJ/kg	Temperatura, °C	Densidad ρ , kg/m ³	Calor específico c_p , kJ/kg · K
Aceite comestible (ligero)					25	910	1.80
Agua	100	2257	0.0	333.7	0	1000	4.22
					25	997	4.18
					50	988	4.18
					75	975	4.19
					100	958	4.22
Alcohol etílico	78.6	855	-156	108	20	789	2.84
Amoniaco	-33.3	1357	-77.7	322.4	-33.3	682	4.43
					-20	665	4.52
					0	639	4.60
					25	602	4.80
Argón	-185.9	161.6	-189.3	28	-185.6	1394	1.14
Benceno	80.2	394	5.5	126	20	879	1.72
n-Butano	-0.5	385.2	-138.5	80.3	-0.5	601	2.31
Dióxido de carbono	-78.4*	230.5 (a 0°C)	-56.6	—	0	298	0.59
Etanol	78.2	838.3	-114.2	109	25	783	2.46
Etilén glicol	198.1	800.1	-10.8	181.1	20	1109	2.84
Glicerina	179.9	974	18.9	200.6	20	1261	2.32
Helio	-268.9	22.8	—	—	-268.9	146.2	22.8
Hidrógeno	-252.8	445.7	-259.2	59.5	-252.8	70.7	10.0
Isobutano	-11.7	367.1	-160	105.7	-11.7	593.8	2.28
Mercurio	356.7	294.7	-38.9	11.4	25	13,560	0.139
Metano	-161.5	510.4	-182.2	58.4	-161.5	423	3.49
					-100	301	5.79
Metanol	64.5	1100	-97.7	99.2	25	787	2.55
Nitrógeno	-195.8	198.6	-210	25.3	-195.8	809	2.06
					-160	596	2.97
Octano	124.8	306.3	-57.5	180.7	20	703	2.10
Oxígeno	-183	212.7	-218.8	13.7	-183	1141	1.71
Petróleo	—	230-384	—	—	20	640	2.0
Propano	-42.1	427.8	-187.7	80.0	-42.1	581	2.25
					0	529	2.53
					50	449	3.13
Queroseno	204-293	251	-24.9	—	20	820	2.00
Refrigerante 134a	-26.1	217.0	-96.6	—	-50	1443	1.23
Salmuera (20% de cloruro de sodio a base másica)	103.9	—	-17.4	—	20	1150	3.11
					-26.1	1374	1.27
					0	1295	1.34
					25	1207	1.43

Fuente: BOLES, Michales; CENGEL, Yunes. *Termodinámica*. p. 912.

Empleando los valores de flujo másico de vapor a condensar, temperatura de agua de inyección y temperatura de mezcla de condensados de salida de la tabla VIII y tabla IX, aunado con los valores de entalpía específica de vapor saturado y calor específico a presión constante del agua encontrados anteriormente, es posible calcular el flujo másico de agua de inyección actual que alimenta al condensador número 1.

$$\dot{m}_w = \dot{m}_v * \frac{h_v - (t_o * C_p)}{C_p * (t_o - t_i)}$$

$$\begin{aligned} \dot{m}_w(\text{Condensador 1, actual}) &= 2\,963,34 * \frac{2\,620,62 - (34,09 * 4,18)}{4,18 * (34,09 - 27,78)} \\ &= 278\,441,47 \text{ Kg/Hr} \end{aligned}$$

Para calcular el flujo másico de agua de inyección con los parámetros propuesto se cambiaran únicamente los valores relacionados con las temperaturas de agua de inyección y temperaturas de mezcla de condensados de salida con los presentados en la tabla X para el condensador número 1.

$$\begin{aligned} \dot{m}_w(\text{Condensador 1, propuesto}) &= 2\,963,34 * \frac{2\,620,62 - (51,1 * 4,18)}{4,18 * (51,1 - 32,22)} \\ &= 90\,338,07 \text{ Kg/Hr} \end{aligned}$$

Para saber si los parámetros de temperatura y consumo de agua de inyección propuestos anteriormente cumplirán con las necesidades de vacío del sistema deseadas por los encargados del área de recuperación de sacarosa, 25 pulgadas de mercurio aproximadamente en vacío relativo, se emplea la gráfica de la figura 23, la cual relaciona la temperatura del agua de inyección en grados Celsius con la relación entre flujos de agua/vapor dentro del condensador para estimar el vacío experimentado. Para obtener la relación entre flujos de agua/vapor se puede emplear la siguiente fórmula:

$$RE = \frac{\dot{m}_w}{\dot{m}_v}$$

Donde:

RE= relación entre flujos de agua y vapor (Kgagua/Kgvapor)

\dot{m}_v = flujo másico de vapor (kg/h)

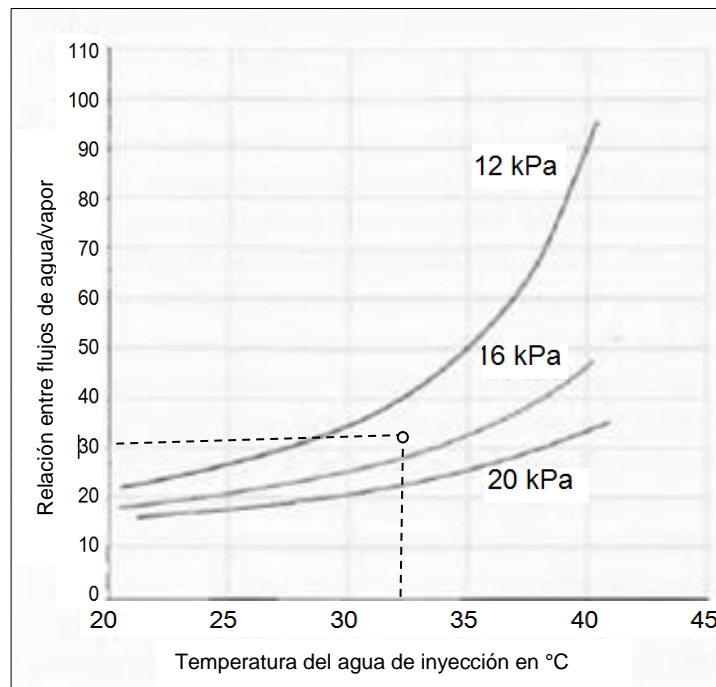
\dot{m}_w = flujo másico de agua (kg/h)

El flujo másico de vapor en el condensador número 1 es de 2 963,34 Kg/h según la tabla VIII, mientras que el flujo másico de agua propuesto se calculó en 90 338,07 Kg/h; de esta forma la relación entre estos flujos será la que se muestra a continuación:

$$RE = \frac{90\,338,07}{2\,963,34} = 30,49 \text{ Kgagua/Kgvapor}$$

Dado que la temperatura de agua de inyección propuesta es de 32,22 grados Celsius y contando con una relación de agua/vapor de 30,49 kilogramos sobre kilogramos, es posible estimar el vacío que se experimentará mediante la gráfica que relaciona la cantidad de agua y vapor en los condensadores barométricos, como se ve a continuación en la figura 26.

Figura 26. **Presión en condensador 1**



Fuente: elaboración propia, con base en REIN, Peter. *Ingeniería de la caña de azúcar*. p. 371.

La presión que se experimentara en el condensador 1 estará entre 12 y 16 kilopascales según la gráfica anterior, lo cual es equivalente a 25 y 26,4 pulgadas de mercurio en vacío relativo; esto quiere decir que se logrará satisfacer las 25 pulgadas de vacío relativo que son necesarios en estos equipos.

Para calcular el flujo másico de agua de inyección y la presión experimentada en cada condensador se repetirá el procedimiento anterior en cada uno de ellos, dado que este procedimiento es el mismo para los 16 condensadores; en la siguiente sección se presenta únicamente el resumen de los resultados obtenidos para la situación actual y propuesta.

2.3.1.4. Presentación y análisis de resultados

La temperatura de operación en el agua de entrada a los condensadores en la situación actual es de 82,00 grados Fahrenheit y la temperatura de salida varía en los 16 condensadores entre 88,94 y 112,25 grados Fahrenheit, como es posible observar en la tabla IX. Con estos valores de temperatura de operación se genera un consumo másico total de agua en los condensadores de 6 822 210,86 kilogramos por hora, como se presenta a continuación en la tabla XIII.

Los parámetros de operación propuestos con base en las mejores capacidades de enfriamiento del nuevo equipo instalado, torre de enfriamiento, se establecen con valores de temperatura de entrada y salida de agua a los condensadores respectivamente de 90,00 y 124,00 grados Fahrenheit, como se presenta en la tabla X. Estos valores de temperatura de operación permitirán que se utilice en cada condensador la cantidad adecuada de agua para realizar su función, presentando un consumo másico estimado de agua total de 3 122 165,30 kilogramos por hora, vea tabla XIV.

Al comparar el consumo de agua actual con el consumo estimado utilizando los parámetros de temperatura propuestos se puede observar una disminución en el uso de este recurso del 57,24 por ciento.

Tabla XIII. **Consumo de agua de inyección, situación actual**

Condensador	Vapor	Entalpía de vapor	Agua de inyección	Agua/vapor
Núm.	Kg/Hr	KJ/kg	kg/Hr	kg/Kg
1	2 963,34	2 620,62	278 441,47	93,96
2	5 926,28	2 617,63	520 214,02	87,78
3	8 541,54	2 615,83	881 239,45	103,17
4	7 300,80	2 615,83	389 245,57	53,32
5	7 300,80	2 615,83	329 069,27	45,07
6	7 299,48	2 613,45	359 948,64	49,31
7	5 545,14	2 624,25	185 190,04	33,40
8	4 679,27	2 605,90	291 595,46	62,32
9	4 679,27	2 617,87	217 719,26	46,53
10	4 680,56	2 620,96	185 386,66	39,61
11	1 035,13	2 619,47	464 435,14	44,87
12	10 614,43	2 621,26	367 916,51	34,66
13	10 111,80	2 628,17	1 566 594,86	154,93
14	3 266,37	2 626,04	127 186,62	38,94
15	3 512,56	2 618,47	262 103,69	74,62
16	5 704,20	2 623,20	395 924,19	69,41
		Total	6 822 210,86	

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIV. Consumo de agua de inyección, situación propuesta

Condensador	Vapor	Entalpía de vapor	Agua de inyección	Agua/vapor
Núm.	Kg/Hr	kJ/kg	kg/Hr	kg/Kg
1	2 963,34	2 620,62	90 338,07	30,49
2	5 926,28	2 617,63	180 439,17	30,45
3	8 541,54	2 615,83	259 872,32	30,42
4	7 300,80	2 615,83	222 123,37	30,42
5	7 300,80	2 615,83	222 123,37	30,42
6	7 299,48	2 613,45	221 863,25	30,39
7	5 545,14	2 624,25	169 299,67	30,53
8	4 679,27	2 605,90	141 776,16	30,30
9	4 679,27	2 617,87	142 485,41	30,45
10	4 680,56	2 620,96	142 708,15	30,49
11	10 350,13	2 619,47	315 374,96	30,47
12	10 614,43	2 621,26	323 669,26	30,49
13	10 111,80	2 628,17	309 226,67	30,58
14	3 266,37	2 626,04	99 799,90	30,55
15	3 512,56	2 618,47	106 985,41	30,46
16	5 704,20	2 623,20	174 080,17	30,52
Total			3 122 165,30	

Fuente: elaboración propia.

2.3.2. Sistema de enfriamiento

Para el valor de los datos de temperatura de entrada y salida de la torre de enfriamiento se emplearán los mismos valores que en los condensadores, haciendo la aclaración que la temperatura de entrada a la torre de enfriamiento es la temperatura de salida del condensador y la temperatura de salida de la torre de enfriamiento es la temperatura de entrada al condensador.

La temperatura de entrada y salida propuesta será de 124,00 y 90,00 grados Fahrenheit, siendo su equivalente en grados Celsius 51,11 y 32,22 respectivamente. A continuación se presenta cómo estos nuevos parámetros de temperatura de agua afectan el consumo de agua y la eficiencia térmica de este sistema.

2.3.2.1. Recolección de datos

Se emplearon los datos de operación promedio registrados en el sistema de aguas industriales de fábrica, los valores de flujos máxicos de condensados que alimentan la torre de enfriamiento en función de los cálculos realizados en la sección anterior y los datos de diseño del informe de *SPX Colling Technologies, Spray Pond Replacement Cooling Tower*.

La tabla XV y la tabla XVI presentan los valores de flujo máxico de alimentación de agua, temperatura de entrada y temperatura de salida del agua de la torre de enfriamiento de la situación actual y propuesta, respectivamente.

Tabla XV. **Datos de agua para cálculos, situación actual en torre de enfriamiento**

Agua de Alimentación	Temperatura de agua a la entrada	Temperatura de agua a la salida
Kg/Hr	°C	°C
6 924 686,82	41,11	27,78

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVI. **Datos de agua para cálculos, situación propuesta en torre de enfriamiento**

Agua de Alimentación	Temperatura de agua a la entrada	Temperatura de agua a la salida
Kg/Hr	°C	°C
3 224 641,26	51,11	32,22

Fuente: elaboración propia.

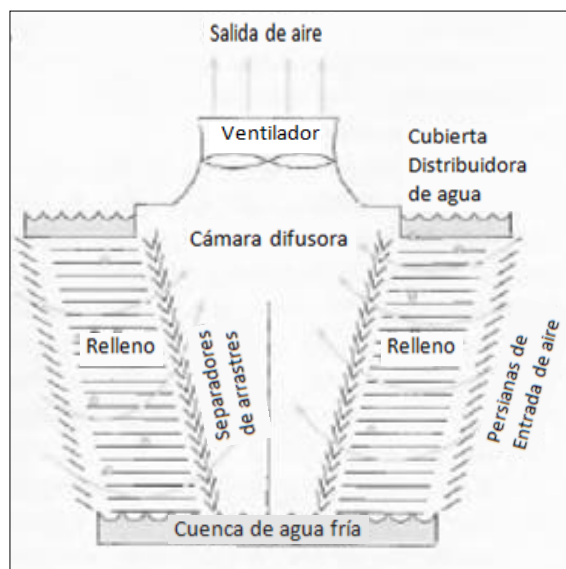
Los valores de agua de alimentación a la torre de enfriamiento en las dos situaciones descritas son la sumatoria del agua que entra al condensador, la cual fue presentada en la sección 2.3.1.4., con el vapor vegetal condensado que proviene de los equipos evapo-cristalizadores, el cual se muestra en la sección 2.3.1.2.

2.3.2.2. Balanceo de masa y energía

Debido a que parte del agua que ingresa a la torre se evapora para lograr el enfriamiento se debe sustituir esta misma con agua de relleno, para saber la cantidad de agua de relleno necesaria se emplearán balanceos de masa y energía.

Para poder realizar balanceos de masa y energía en una torre de enfriamiento se puede considerar a esta como adiabática, es decir que no existirán transferencias de calor entre la torre y otros sistemas; por lo tanto la única interacción será entre el agua y el flujo de aire. En la figura 27 se muestra la estructura básica de una torre de enfriamiento de flujo cruzado.

Figura 27. **Esquema de torre de enfriamiento de flujo cruzado**



Fuente: REIN, Peter. *Ingeniería de la caña de azúcar*. p. 385.

Tomando en cuenta la consideración antes descrita los únicos flujos másicos que se tomarán serán los del agua de alimentación o agua caliente, agua de salida o agua fría y el flujo de aire.

$$\dot{m}_3 + \dot{m}_a * \omega_1 = \dot{m}_4 + \dot{m}_a * \omega_2$$

Donde:

\dot{m}_a = flujo másico de aire (Kg/h)

\dot{m}_3 = flujo másico de agua caliente (Kg/h)

ω_1 = humedad específica del aire de entrada (Kg/Kg)

\dot{m}_4 = flujo másico de agua fría (Kg/h)

ω_2 = humedad específica del aire a la salida (Kg/Kg)

De igual manera para realizar el balanceo de energía se consideran los mismos flujos.

$$\dot{m}_a * h_1 + \dot{m}_3 * h_3 = \dot{m}_a * h_2 + \dot{m}_4 * h_4$$

Donde:

\dot{m}_a = flujo másico de aire (Kg/h)

\dot{m}_3 = flujo másico de agua caliente (Kg/h)

\dot{m}_4 = flujo másico de agua fría (Kg/h)

h_1 = entalpía específica del aire de entrada (KJ/Kg)

h_2 = entalpía específica del aire a la salida (KJ/Kg)

h_3 = entalpía específica del agua caliente (KJ/Kg)

h_4 = entalpía específica del agua fría (KJ/Kg)

El agua de relleno para la torre de enfriamiento es el agua que debe ser agregada para reponer el agua que se evapora y sale del sistema, esta será la diferencia entre el agua de entrada y el agua de salida; esto se puede expresar como el flujo de aire existente en la torre por la diferencia de la humedad específica del mismo a la salida respecto de la humedad específica a la entrada, comprendiendo que la humedad específica del aire es la masa de vapor de agua presente en una unidad de masa de aire seco, dado que el aire gana humedad a medida que pasa a través de la torre su humedad específica será mayor a la salida que a la entrada.

$$\dot{m}_3 - \dot{m}_4 = \dot{m}_a(\omega_2 - \omega_1) = \dot{m}_{\text{relleno}}$$

Donde:

\dot{m}_3 = flujo másico de agua caliente (Kg/h)

\dot{m}_4 = flujo másico de agua fría (Kg/h)

\dot{m}_a = flujo másico de aire (Kg/h)

ω_1 = humedad específica del aire de entrada (Kg/Kg)

ω_2 = humedad específica del aire a la salida (Kg/Kg)

\dot{m}_{relleno} = flujo másico de agua de relleno (Kg/h)

Tomando en cuenta esta expresión se puede encontrar como primer paso el flujo de aire que existirá en la torre de enfriamiento, realizando el despeje en las fórmulas anteriores se obtiene la siguiente expresión:

$$\dot{m}_a = \frac{\dot{m}_3 * (h_3 - h_4)}{(h_2 - h_1) - (\omega_2 - \omega_1) * h_4}$$

Para resolver esta ecuación se necesitan los valores de la entalpía específica tanto del agua como del aire y las humedades específicas del aire. El valor de entalpía del aire podemos obtenerlo en base a la siguiente fórmula:

$$h = C_p * T + \omega * h_g$$

Donde:

h = entalpía específica del aire (KJ/Kg)

C_p = calor específico del aire a presión constante (KJ/Kg*°C)

T = temperatura del aire (°C)

ω = humedad específica del aire (Kg/Kg)

h_g = entalpía específica de vapor saturado (KJ/Kg)

Para calcular la entalpía de entrada y entalpía de salida del aire es necesario saber su temperatura de entrada y salida a la torre. La temperatura de entrada del aire será la temperatura de bulbo seco, esta no es más que la temperatura del ambiente medida con un termómetro. La tabla XVII muestra las mediciones realizadas a diferentes horas durante 22 días del mes de abril de la zafra 20013-2014.

Con base en la tabla XVII se utiliza como valor promedio de temperatura de aire a la entrada de la torre de enfriamiento 27,25 grados Celsius. Para obtener el dato de temperatura de aire a la salida de la torre se puede utilizar la consideración descrita por Peter Rein en su libro de "Ingeniería de la caña de azúcar", en la cual el 85 por ciento de la temperatura extraída en la torre de enfriamiento es transferida al aire; la tabla XVIII muestra los valores de temperatura de salida del aire a esperarse con base en la diferencia de temperatura de entrada y salida del agua a la torre.

Tabla XVII. **Temperatura de bulbo seco, torre de enfriamiento**

Temperatura de bulbo seco (°C)						
Núm.	08:00	10:00	12:00	14:00	16:00	Promedio
1	24	27	31	29	26	27,40
2	25	27	30	28	24	26,80
3	25	28	32	29	26	28,00
4	24	29	32	29	25	27,80
5	23	28	31	28	24	26,80
6	24	27	31	29	26	27,40
7	25	26	30	28	25	26,80
8	26	28	32	29	26	28,20
9	24	27	31	29	26	27,40
10	23	28	31	28	24	26,80
11	23	28	31	28	24	26,80
12	25	27	30	28	24	26,80
13	25	27	30	28	24	26,80
14	23	28	31	28	24	26,80
15	26	28	32	29	26	28,20
16	24	27	31	29	26	27,40
17	25	27	30	28	24	26,80
18	23	28	31	28	24	26,80
19	24	27	31	29	26	27,40
20	26	28	32	29	26	28,20
21	23	28	31	28	24	26,80
22	23	27	30	27	24	26,20
					Promedio	27,25

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVIII. **Temperatura de salida del aire, torre de enfriamiento**

	Temperatura de entrada del aire	Diferencia de temperatura del agua	Temperatura de salida del aire
	°C	°C	°C
Situación actual	27,25	13,33	38,53
Situación propuesta	27,25	18,89	43,26

Fuente: elaboración propia.

Ahora se poseen los valores de temperatura a la entrada y salida de la torre tanto en la situación actual como en la situación propuesta. Para calcular el valor de humedad específica se puede emplear la siguiente fórmula:

$$\omega = \frac{0.622 * \varphi * P_g}{P - \varphi * P_g}$$

Donde:

ω = humedad específica del aire (KgH₂O/Kg aire)

P= presión atmosférica (KPa)

φ = humedad relativa (KgH₂O/KgH₂O)

P_g= presión de vapor saturado (KPa)

La tabla VII muestra el valor de humedad relativa del aire a la entrada de la torre siendo este del 50 por ciento y debido a que el aire saldrá totalmente saturado al pasar a través de la misma su humedad relativa de salida será del 100 por ciento, entendiendo que la humedad relativa es la relación porcentual que existe entre la cantidad en masa de agua que contiene una unidad de masa de aire seco respecto de la cantidad máxima de masa de agua que puede contener la misma unidad de masa de aire seco bajo iguales condiciones. Esta tabla también presenta la altura sobre el nivel del mar a la cual se encuentra la torre de enfriamiento, 600 pies sobre el nivel del mar; con ello es posible obtener la presión atmosférica con base en la tabla XIX.

Tabla XIX. **Propiedades atmosféricas**

Altitud, ft	Temperatura, °F	Presión, psia	Gravedad, g, ft/s ²	Velocidad del sonido, ft/s	Densidad, lbm/ft ³	Viscosidad μ , lbm/ft · s	Conductividad térmica, Btu/h · ft · R
0	59.00	14.7	32.174	1116	0.07647	1.202×10^{-5}	0.0146
500	57.22	14.4	32.173	1115	0.07536	1.199×10^{-5}	0.0146
1000	55.43	14.2	32.171	1113	0.07426	1.196×10^{-5}	0.0146
1500	53.65	13.9	32.169	1111	0.07317	1.193×10^{-5}	0.0145
2000	51.87	13.7	32.168	1109	0.07210	1.190×10^{-5}	0.0145
2500	50.09	13.4	32.166	1107	0.07104	1.186×10^{-5}	0.0144
3000	48.30	13.2	32.165	1105	0.06998	1.183×10^{-5}	0.0144
3500	46.52	12.9	32.163	1103	0.06985	1.180×10^{-5}	0.0143
4000	44.74	12.7	32.162	1101	0.06792	1.177×10^{-5}	0.0143
4500	42.96	12.5	32.160	1099	0.06690	1.173×10^{-5}	0.0142
5000	41.17	12.2	32.159	1097	0.06590	1.170×10^{-5}	0.0142
5500	39.39	12.0	32.157	1095	0.06491	1.167×10^{-5}	0.0141
6000	37.61	11.8	32.156	1093	0.06393	1.164×10^{-5}	0.0141
6500	35.83	11.6	32.154	1091	0.06296	1.160×10^{-5}	0.0141
7000	34.05	11.3	32.152	1089	0.06200	1.157×10^{-5}	0.0140
7500	32.26	11.1	32.151	1087	0.06105	1.154×10^{-5}	0.0140
8000	30.48	10.9	32.149	1085	0.06012	1.150×10^{-5}	0.0139
8500	28.70	10.7	32.148	1083	0.05919	1.147×10^{-5}	0.0139
9000	26.92	10.5	32.146	1081	0.05828	1.144×10^{-5}	0.0138
9500	25.14	10.3	32.145	1079	0.05738	1.140×10^{-5}	0.0138
10,000	23.36	10.1	32.145	1077	0.05648	1.137×10^{-5}	0.0137
11,000	19.79	9.72	32.140	1073	0.05473	1.130×10^{-5}	0.0136
12,000	16.23	9.34	32.137	1069	0.05302	1.124×10^{-5}	0.0136
13,000	12.67	8.99	32.134	1065	0.05135	1.117×10^{-5}	0.0135
14,000	9.12	8.63	32.131	1061	0.04973	1.110×10^{-5}	0.0134
15,000	5.55	8.29	32.128	1057	0.04814	1.104×10^{-5}	0.0133
16,000	+1.99	7.97	32.125	1053	0.04659	1.097×10^{-5}	0.0132
17,000	-1.58	7.65	32.122	1049	0.04508	1.090×10^{-5}	0.0132
18,000	-5.14	7.34	32.119	1045	0.04361	1.083×10^{-5}	0.0130
19,000	-8.70	7.05	32.115	1041	0.04217	1.076×10^{-5}	0.0129
20,000	-12.2	6.76	32.112	1037	0.04077	1.070×10^{-5}	0.0128
22,000	-19.4	6.21	32.106	1029	0.03808	1.056×10^{-5}	0.0126
24,000	-26.5	5.70	32.100	1020	0.03553	1.042×10^{-5}	0.0124
26,000	-33.6	5.22	32.094	1012	0.03311	1.028×10^{-5}	0.0122
28,000	-40.7	4.78	32.088	1003	0.03082	1.014×10^{-5}	0.0121
30,000	-47.8	4.37	32.082	995	0.02866	1.000×10^{-5}	0.0119
32,000	-54.9	3.99	32.08	987	0.02661	0.986×10^{-5}	0.0117
34,000	-62.0	3.63	32.07	978	0.02468	0.971×10^{-5}	0.0115

Fuente: BOLES, Michales; CENGEL, Yunes. *Termodinámica*. p. 981.

Se deben interpolar los valores de la tabla anterior para encontrar la presión atmosférica a 600 pies de altura, para ello se emplean los valores de altura de 500 y 1 000 pies con su presión atmosférica respectiva de 14,4 y 14,2 libras sobre pulgada cuadrada.

$$y = y_1 - (y_1 - y_0) * \frac{x_1 - x}{x_1 - x_0}$$

$$y = 14,4 - (14,4 - 14,2) * \frac{500 - 600}{500 - 1\ 000} = 14,36 \text{ PSI}$$

La presión atmosférica a 600 pies sobre el nivel del mar es de 14,36 libras sobre pulgada cuadrada (PSI), lo cual es equivalente a 99,15 kilopascales (KPa).

Para obtener la presión de vapor saturado se emplea la tabla XI en la cual se utilizará la temperatura del aire como temperatura de saturación y se buscará la presión de saturación correspondiente. Para encontrar el valor de presión de vapor saturado para el aire de entrada en la situación actual se emplea la temperatura promedio de entrada de aire de la tabla XVII, 27,25 grados Celsius, dado que no existe un valor directo de presión de vapor saturado para esta temperatura, se debe interpolar entre los valores de temperatura de 25 y 30 Celsius con sus respectivas presiones de vapor saturado de 3,1696 y 4,2469 kilopascales (KPa).

$$y = y_1 - (y_1 - y_0) * \frac{x_1 - x}{x_1 - x_0}$$

$$y = 3,1696 - (3,1696 - 4,2469) * \frac{25 - 27,25}{25 - 30} = 3,64 \text{ KPa}$$

La presión de vapor saturado para el aire a la entrada de la torre en la situación actual es de 3,64 kilopascales, para los valores de presión de vapor saturado a las temperaturas de salida tanto en la situación propuesta como en la situación actual se sigue el mismo procedimiento; a continuación se presentará el resumen de los resultados. La tabla XX muestra los valores de presión de vapor saturado obtenidos para el aire a la entrada y la salida de la torre de enfriamiento tanto para la situación actual y propuesta.

Tabla XX. **Presión de vapor saturado del aire**

	Temperatura de entrada del aire	Presión de vapor saturado de aire a la entrada	Temperatura de salida del aire	Presión de vapor saturado de aire a la salida
	°C	KPa	°C	KPa
Situación actual	27,25	3,64	38,53	6,87
Situación propuesta	27,25	3,64	43,26	8,83

Fuente: elaboración propia.

Con estos datos ya es posible calcular la humedad específica del aire tanto a la entrada como a la salida de la torre de enfriamiento. Para la humedad específica a la entrada de la torre en la situación actual se sustituye la ecuación con los valores de presión atmosférica y presión de vapor saturado respectivos con una humedad relativa del 50 por ciento.

$$\omega_1(\text{Situación actual}) = \frac{0,622 * 0,50 * 3,64}{99,15 - 0,50 * 3,64} = 0,01164 \text{ KgH}_2\text{O/Kgaire}$$

Para la humedad específica a la salida de la torre en la situación actual se sustituye la ecuación con los valores de presión atmosférica y presión de vapor saturado respectivos, con una humedad relativa del 100 por ciento.

$$\omega_2(\text{Situación actual}) = \frac{0,622 * 1,00 * 6,87}{99,15 - 1,00 * 6,87} = 0,04630 \text{ KgH}_2\text{O/Kgair}$$

Este mismo procedimiento es repetido para encontrar los valores de la humedad específica del aire para la situación propuesta; a continuación se presenta el resumen de los resultados. La tabla XXI muestra las humedades específicas del aire a la entrada y la salida de la torre de enfriamiento para la situación actual y propuesta.

Tabla XXI. **Humedad específica del aire**

	Humedad específica de aire a la entrada	Humedad específica de aire a la salida
	KgH ₂ O/Kgair	KgH ₂ O/Kgair
Situación actual	0,01164	0,04630
Situación propuesta	0,01164	0,06078

Fuente: elaboración propia.

Como siguiente paso es necesario obtener el valor del calor específico del aire a presión constante, se emplea la tabla XXII.

Tabla XXII. **Calor específico del aire**

Temperatura, K	c_p	c_v	k
	$\text{kJ/kg} \cdot \text{K}$	$\text{kJ/kg} \cdot \text{K}$	
	<i>Aire</i>		
250	1.003	0.716	1.401
300	1.005	0.718	1.400
350	1.008	0.721	1.398
400	1.013	0.726	1.395
450	1.020	0.733	1.391
500	1.029	0.742	1.387
550	1.040	0.753	1.381
600	1.051	0.764	1.376
650	1.063	0.776	1.370
700	1.075	0.788	1.364
750	1.087	0.800	1.359
800	1.099	0.812	1.354
900	1.121	0.834	1.344
1000	1.142	0.855	1.336

Fuente: BOLES, Michales; CENGEL, Yunes. *Termodinámica*. p. 910.

Los valores de temperatura presentados en la tabla anterior están en grados Kelvin por lo tanto se debe convertir la temperatura en Celsius del flujo de aire a grados Kelvin.

$$K = ^\circ\text{C} + 273,15$$

Donde:

K = grados kelvin (K)

$^\circ\text{C}$ = grados Celsius ($^\circ\text{C}$)

Se convierte la temperatura del aire a la entrada de la torre de grados Celsius a grados Kelvin, siendo esta de 27,25 grados Celsius.

$$K = 27,25 + 273,15 = 300,4 \text{ K}$$

Con la temperatura de entrada del aire a la torre en grados Kelvin ya es posible buscar el calor específico del aire a esa temperatura, en la tabla XXII se observa que tiene un valor aproximado de 1,005 kilojoules por kilogramo por unidad de temperatura. El mismo procedimiento se repite para las temperaturas de salida del aire de la torre de enfriamiento para ambas situaciones estudiadas; la tabla XXIII muestra los valores del calor específico para el flujo de aire empleado en la torre en la situación actual y propuesta.

Tabla XXIII. **Calor específico a presión constante del aire**

	Calor especifico (Cp) de aire a la entrada KJ/Kg * K	Calor especifico (Cp) de aire a la salida KJ/Kg * K
Situación actual	1,005	1,006
Situación propuesta	1,005	1,006

Fuente: elaboración propia.

En este momento el dato faltante para poder calcular la entalpía del aire es el valor de la entalpía de vapor saturado a la temperatura del aire, para poder obtener este dato se emplea la tabla XXIV.

Tabla XXIV. Entalpía de vapor saturado del aire

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, $kJ/kg \cdot K$			
		Liq. sat., v_f	Vapor sat., v_g	Liq. sat., u_f	Evap., u_{fg}	Vapor sat., u_g	Liq. sat., h_f	Evap., h_{fg}	Vapor sat., h_g	Liq. 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	
55	15.763	0.001015	9.5639	230.24	2219.1	2449.3	230.26	2369.8	2600.1	0.7680	7.2218	7.9898	
60	19.947	0.001017	7.6670	251.16	2204.7	2455.9	251.18	2357.7	2608.8	0.8313	7.0769	7.9082	
65	25.043	0.001020	6.1935	272.09	2190.3	2462.4	272.12	2345.4	2617.5	0.8937	6.9360	7.8296	
70	31.202	0.001023	5.0396	293.04	2175.8	2468.9	293.07	2333.0	2626.1	0.9551	6.7989	7.7540	
75	38.597	0.001026	4.1291	313.99	2161.3	2475.3	314.03	2320.6	2634.6	1.0158	6.6655	7.6812	
80	47.416	0.001029	3.4053	334.97	2146.6	2481.6	335.02	2308.0	2643.0	1.0756	6.5355	7.6111	
85	57.868	0.001032	2.8261	355.96	2131.9	2487.8	356.02	2295.3	2651.4	1.1346	6.4089	7.5435	
90	70.183	0.001036	2.3593	376.97	2117.0	2494.0	377.04	2282.5	2659.6	1.1929	6.2853	7.4782	
95	84.609	0.001040	1.9808	398.00	2102.0	2500.1	398.09	2269.6	2667.6	1.2504	6.1647	7.4151	
100	101.42	0.001043	1.6720	419.06	2087.0	2506.0	419.17	2256.4	2675.6	1.3072	6.0470	7.3542	
105	120.90	0.001047	1.4186	440.15	2071.8	2511.9	440.28	2243.1	2683.4	1.3634	5.9319	7.2952	
110	143.38	0.001052	1.2094	461.27	2056.4	2517.7	461.42	2229.7	2691.1	1.4188	5.8193	7.2382	
115	169.18	0.001056	1.0360	482.42	2040.9	2523.3	482.59	2216.0	2698.6	1.4737	5.7092	7.1829	
120	198.67	0.001060	0.89133	503.60	2025.3	2528.9	503.81	2202.1	2706.0	1.5279	5.6013	7.1292	
125	232.23	0.001065	0.77012	524.83	2009.5	2534.3	525.07	2188.1	2713.1	1.5816	5.4956	7.0771	
130	270.28	0.001070	0.66808	546.10	1993.4	2539.5	546.38	2173.7	2720.1	1.6346	5.3919	7.0265	
135	313.22	0.001075	0.58179	567.41	1977.3	2544.7	567.75	2159.1	2726.9	1.6872	5.2901	6.9773	
140	361.53	0.001080	0.50850	588.77	1960.9	2549.6	589.16	2144.3	2733.5	1.7392	5.1901	6.9294	
145	415.68	0.001085	0.44600	610.19	1944.2	2554.4	610.64	2129.2	2739.8	1.7908	5.0919	6.8827	
150	476.16	0.001091	0.39248	631.66	1927.4	2559.1	632.18	2113.8	2745.9	1.8418	4.9953	6.8371	
155	543.49	0.001096	0.34648	653.19	1910.3	2563.5	653.79	2098.0	2751.8	1.8924	4.9002	6.7927	
160	618.23	0.001102	0.30680	674.79	1893.0	2567.8	675.47	2082.0	2757.5	1.9426	4.8066	6.7492	
165	700.93	0.001108	0.27244	696.46	1875.4	2571.9	697.24	2065.6	2762.8	1.9923	4.7143	6.7067	
170	792.18	0.001114	0.24260	718.20	1857.5	2575.7	719.08	2048.8	2767.9	2.0417	4.6233	6.6650	
175	892.60	0.001121	0.21659	740.02	1839.4	2579.4	741.02	2031.7	2772.7	2.0906	4.5335	6.6242	
180	1002.8	0.001127	0.19384	761.92	1820.9	2582.8	763.05	2014.2	2777.2	2.1392	4.4448	6.5841	
185	1123.5	0.001134	0.17390	783.91	1802.1	2586.0	785.19	1996.2	2781.4	2.1875	4.3572	6.5447	
190	1255.2	0.001141	0.15636	806.00	1783.0	2589.0	807.43	1977.9	2785.3	2.2355	4.2705	6.5059	
195	1398.8	0.001149	0.14089	828.18	1763.6	2591.7	829.78	1959.0	2788.8	2.2831	4.1847	6.4678	
200	1554.9	0.001157	0.12721	850.46	1743.7	2594.2	852.26	1939.8	2792.0	2.3305	4.0997	6.4302	

Fuente: BOLES, Michales; CENGEL, Yunes. *Termodinámica*. p. 914.

Para saber el valor de la entalpía de vapor saturado del aire a la entrada de la torre en la situación actual se utiliza el valor de la temperatura del aire a la entrada, 27,25 grados Celsius, buscando el valor de entalpía de vapor saturado a esta temperatura en la tabla XXIV se observa que es necesario interpolar entre los valores de temperatura de 25 y 30 grados Celsius y los valores de entalpía de vapor respectivos de 2 546,5 y 2 555,6 kilojoules partido kilogramo.

$$y = y_1 - (y_1 - y_0) * \frac{x_1 - x}{x_1 - x_0}$$

$$y = 2\,546,5 - (2\,546,5 - 2\,555,6) * \frac{25 - 27,25}{25 - 30} = 2\,550,50 \text{ KJ/Kg}$$

El valor de la entalpía de vapor saturado del aire a la temperatura de entrada a la torre es de 2 550,50 kilojoules por kilogramo; este procedimiento se repite para la temperatura de salida del aire de la torre para ambas situaciones estudiadas, estos resultados se encuentran registrados en la tabla XXV.

Tabla XXV. **Entalpía de vapor saturado del aire, torre de enfriamiento**

	Entalpía de vapor saturado del aire a la entrada	Entalpía de vapor saturado del aire a la salida
	KJ/Kg	KJ/Kg
Situación actual	2 550,50	2 570,88
Situación propuesta	2 550,50	2 579,30

Fuente: elaboración propia.

En este momento se poseen los datos necesarios para calcular la entalpía específica del aire tanto a la entrada como a la salida de la torre. Para obtener la entalpía específica del aire a la entrada de la torre en la situación actual se utilizan los valores de calor específico a presión constante de la tabla XXIII, 1,005 kilojoules por kilogramo por unidad de temperatura, la temperatura del aire a la entrada de la tabla XVIII, 27,25 grados Celsius, la humedad específica del aire a la entrada de la tabla XXI, 0,01164 kilogramo sobre kilogramo y la entalpía de vapor saturado del aire a la entrada de la tabla XXV, 2 550,50 kilojoules por kilogramo.

$$h_1(\text{Situación actual}) = (1,005 * 27,25 + 0,01164 * 2\,550,50) \frac{\text{kJ}}{\text{Kg}} = 57,03 \text{ KJ/Kg}$$

El valor de la entalpía específica del aire a la entrada en la situación actual es de 57,03 kilojoules por kilogramo, para calcular el valor de la entalpía específica del aire a la entrada y la salida de la torre en ambas situaciones estudiadas se repite el mismo procedimiento, los valores calculados son presentados en la tabla XXVI.

Tabla XXVI. **Entalpía específica del aire, torre de enfriamiento**

	Entalpía específica del aire a la entrada	Entalpía específica del aire a la salida
	KJ/Kg	KJ/Kg
Situación actual	57,03	157,79
Situación propuesta	57,03	200,29

Fuente: elaboración propia.

Para calcular el valor del flujo másico de aire necesario en la torre de enfriamiento falta únicamente conocer los valores de entalpía específica del agua a la entrada y salida de la misma; estos valores es posible obtenerlos de la tabla XXV, se utilizará el valor de la entalpía de líquido saturado a la temperatura de entrada y salida del agua.

Para calcular la entalpía de líquido saturado del agua a la entrada de la torre en la situación actual se emplea el valor de temperatura del agua de alimentación a la torre de la tabla XV, 41,11 grados Celsius, se realiza una interpolación para conocer el valor de entalpía de líquido saturado; para este caso empleando los valores de temperatura de 40 y 45 grados Celsius con las respectivas entalpías de líquido saturado de 167,53 y 188,44 kilojoules por kilogramo.

$$y = y_1 - (y_1 - y_0) * \frac{x_1 - x}{x_1 - x_0}$$

$$y = 167,53 - (167,53 - 188,44) * \frac{40 - 41,11}{40 - 45} = 172,17 \text{ KJ/Kg}$$

El valor de la entalpía específica del agua a la entrada de la torre de enfriamiento en la situación actual es de 172,17 kilojoules por kilogramo, para calcular la entalpía específica del agua a la entrada y salida de la torre en ambas situaciones estudiadas se empleará el mismo procedimiento; la tabla XXVII presenta el resumen de los resultados obtenidos de entalpía específica para el flujo de agua utilizado en la torre para la situación actual y propuesta.

Tabla XXVII. **Entalpía específica del agua, torre de enfriamiento**

	Entalpía específica del agua a la entrada KJ/Kg	Entalpía específica del agua a la salida KJ/Kg
Situación actual	172,17	116,46
Situación propuesta	213,98	135,02

Fuente: elaboración propia.

Para calcular el flujo másico de aire en la torre de enfriamiento para la situación actual se empleara el valor del flujo másico de agua caliente que entra a la torre de la tabla XV, 6 924 686,82 kilogramos por hora, la humedad específica del aire a la entrada de la torre de la tabla XXI, 0,01164 kilogramo sobre kilogramo, la humedad específica del aire a la salida de la torre de la tabla XXI, 0,04630 kilogramos sobre kilogramos; la entalpía específica del aire a la entrada de la torre de la tabla XXVI, 57,03 kilojoules por kilogramo, la entalpía específica del aire a la salida de la torre de la tabla XXVI, 157,79 kilojoules por kilogramo, la entalpía específica del agua a la entrada de la torre de la tabla XXVII, 172,17 kilojoules por kilogramo y la entalpía específica del agua a la salida de la torre de la tabla XXVII, 116,46 kilojoules por kilogramo.

$$\begin{aligned} \dot{m}_a(\text{Situación actual}) &= \left(\frac{6\,924\,686,82 * (172,17 - 116,46)}{(157,79 - 57,03) - (0,04630 - 0,01164) * 116,46} \right) \frac{\text{Kg}}{\text{Hr}} \\ &= 3\,988\,518,88 \text{ Kg/Hr} \end{aligned}$$

El flujo másico de aire necesario en la torre de enfriamiento en la situación actual es de 3 988 518,88 kilogramos por hora, para calcular el flujo de aire para la situación propuesta se repite el mismo procedimiento con los datos del caso respectivo, la tabla XXVIII presenta el resumen de los resultados de flujo másico de aire para ambas situaciones estudiadas.

Tabla XXVIII. **Flujo másico del aire, torre de enfriamiento**

	Flujo másico de aire
	Kg/Hr
Situación actual	3 988 518,88
Situación propuesta	1 863 663,10

Fuente: elaboración propia.

Con estos valores es posible calcular el flujo másico de agua de relleno hacia la torre de enfriamiento, para la situación actual se deben utilizar los valores de flujo másico de aire de la tabla XXVIII, 3 988 518,88 kilogramos por hora, la humedad específica del aire a la entrada de la torre de la tabla XXI, 0,01164 kilogramos sobre kilogramos y la humedad específica del aire a la salida de la torre de la tabla XXI, 0,04630 kilogramo sobre kilogramo.

$$\begin{aligned} \dot{m}_{\text{relleno}}(\text{Situación actual}) &= (3\,988\,518,88 * (0,04630 - 0,01164)) \frac{\text{Kg}}{\text{Hr}} \\ &= 138\,223,42 \text{ Kg/Hr} \end{aligned}$$

El flujo másico de agua de relleno a la torre de enfriamiento en la situación actual es de 138 223,42 kilogramos por hora, para calcular el flujo de agua de relleno para la situación propuesta se repite el mismo procedimiento con los datos del caso respectivo, la tabla XXIX presenta el resumen de los resultados de flujo másico de agua de relleno para ambas situaciones estudiadas.

Tabla XXIX. **Flujo másico del agua de relleno, torre de enfriamiento**

	Flujo másico de agua de relleno
	Kg/Hr
Situación actual	138 223,42
Situación propuesta	91 577,22

Fuente: elaboración propia.

2.3.2.3. Cálculo de eficiencia térmica

La eficiencia térmica en este tipo de sistemas de enfriamiento representa la disminución de temperatura logrado respecto de la máxima disminución de temperatura que en teoría se podría alcanzar. El enfriamiento logrado se expresa como la diferencia entre la temperatura de entrada y la temperatura de salida del agua, para establecer cuál sería el enfriamiento máximo se realiza la resta entre la temperatura de entrada del agua y la temperatura de bulbo húmedo. La temperatura de bulbo húmedo indica la cantidad de calor total contenida en el aire; esta representa la temperatura más baja que es posible alcanzar en este sistema de enfriamiento evaporativo en las condiciones de temperatura de bulbo seco y la humedad relativa.

$$\eta = \frac{t_i - t_o}{t_i - t_{wb}} * 100$$

Donde:

η = eficiencia térmica (°C/°C)

t_i = temperatura de entrada del agua (°C)

t_o = temperatura de salida del agua (°C)

t_{wb} = temperatura de bulbo húmedo (°C)

Se analizará la eficiencia térmica bajo las condiciones de diseño de la torre entregadas por el fabricante, la situación actual y la situación propuesta, la tabla XXX muestra los valores de temperatura de agua para realizar los cálculos.

Tabla XXX. **Datos de agua para cálculos, eficiencia térmica**

	Temperatura de agua a la entrada	Temperatura de agua a la salida
	°C	°C
Situación teórica (fabricante)	47,22	32,22
Situación actual	41,11	27,78
Situación propuesta	51,11	32,22

Fuente: elaboración propia, con base en informe de *SPX Colling Technologies*.

Se empleará como valor de temperatura de bulbo húmedo 80 grados Fahrenheit, lo cual equivale a 26,67 grados Celsius, que es proporcionada por el fabricante de la torre de enfriamiento presentado en la tabla VII. Para la situación teórica se emplearan los valores de diseño, proporcionados por SPX Colling Technologies, de la temperatura del agua a la entrada y la salida de la torre presentados en la tabla XXX.

$$\eta(\text{Situación teórica}) = \frac{47,22 - 32,22}{47,22 - 26,67} * 100 = 72,99 \%$$

La eficiencia térmica que presenta la situación teórica, considerando los datos de diseño del fabricante, es del 72,99 por ciento, para obtener el valor de la eficiencia térmica en la situación actual y propuesta se repite el mismo procedimiento. El resumen de los resultados de eficiencia térmica para las situaciones mencionadas anteriormente se presenta en la tabla XXXI.

Tabla XXXI. **Eficiencia térmica, torre de enfriamiento**

	Eficiencia térmica
	%
Situación teórica (fabricante)	72,99
Situación actual	92,31
Situación propuesta	77,29

Fuente: elaboración propia.

2.3.2.4. Presentación y análisis de resultados

Los valores de flujo de alimentación hacia la torre de enfriamiento, flujo de agua de relleno, flujo de agua de salida de la torre de enfriamiento y eficiencia térmica de la situación actual y propuesta se presentan en la tabla XXXII.

Tabla XXXII. **Flujo de agua y eficiencia térmica, torre de enfriamiento**

	Flujo de agua a la entrada	Flujo de agua de relleno	Eficiencia térmica
	Kg/Hr	Kg/Hr	%
Situación actual	6 924 686,82	138 223,42	92,31
Situación propuesta	3 224 641,26	91 577,22	77,29

Fuente: elaboración propia.

Se puede observar en los valores presentados en la tabla anterior que se tiene un consumo de agua de relleno actualmente de 138 223,42 kilogramos por hora y empleando los parámetros de la situación propuesta se tiene un consumo de agua de relleno de 91 577,22 kilogramos por hora; esto representa un ahorro de agua de 46 646,20 kilogramos por hora, lo cual equivale a una disminución en el consumo de agua de relleno del 33,75 por ciento.

Se observa también que la eficiencia térmica de la situación propuesta es menor que en la situación actual; esto es debido a que la temperatura a la cual ingresa el agua a la torre es mayor y se espera que la temperatura de salida de la misma se incremente, pero se logrará en la situación propuesta utilizar flujos menores de agua, por lo cual se compensa esta pérdida de eficiencia.

Vale la pena mencionar que la eficiencia térmica de la situación propuesta es mayor a la eficiencia teórica que garantiza el fabricante.

2.3.2.5. Comparación de consumo de agua

Para poder analizar de mejor forma las en los consumos de agua en el sistema es necesario presentar la cantidad de agua en galones que se empleará a lo largo de toda la zafra, aproximadamente 180 días, en la situación actual y propuesta. Ya se conocen los flujos másicos que alimentan a los condensadores, para obtener los galones por zafra se deben dividir estos dentro de su densidad y posteriormente hacer la conversión a galones.

$$Q = \frac{\dot{m}}{\rho}$$

Donde:

Q = flujo volumétrico (m³/h)

\dot{m} = flujo másico (Kg/h)

ρ = densidad del agua (Kg/m³)

Para calcular la cantidad de galones utilizados en la situación actual se utiliza el valor de flujo másico de agua de inyección total de la tabla XIII, 6 822 210,86 kilogramos por hora, y se utiliza el valor de temperatura de agua de inyección de la tabla IX, 27,78 °C, para encontrar su densidad en la tabla XXXIII.

Tabla XXXIII. **Propiedades físicas del agua**

Temperatura (°C)	Peso específico G (kN/m ³)	Densidad R (kg/m ³)	Viscosidad dinámica H (Pa·s)	Viscosidad cinemática N (m ² /s)
0	9.81	1000	1.75 * 10 ⁻³	1.75 * 10 ⁻⁶
5	9.81	1000	1.52 * 10 ⁻³	1.52 * 10 ⁻⁶
10	9.81	1000	1.30 * 10 ⁻³	1.30 * 10 ⁻⁶
15	9.81	1000	1.15 * 10 ⁻³	1.15 * 10 ⁻⁶
20	9.79	998	1.02 * 10 ⁻³	1.02 * 10 ⁻⁶
25	9.78	997	8.91 * 10 ⁻⁴	8.94 * 10 ⁻⁷
30	9.77	996	8.00 * 10 ⁻⁴	8.03 * 10 ⁻⁷
35	9.75	994	7.18 * 10 ⁻⁴	7.22 * 10 ⁻⁷
40	9.73	992	6.51 * 10 ⁻⁴	6.56 * 10 ⁻⁷
45	9.71	990	5.94 * 10 ⁻⁴	6.00 * 10 ⁻⁷
50	9.69	988	5.41 * 10 ⁻⁴	5.48 * 10 ⁻⁷
55	9.67	986	4.98 * 10 ⁻⁴	5.05 * 10 ⁻⁷
60	9.65	984	4.60 * 10 ⁻⁴	4.67 * 10 ⁻⁷
65	9.62	981	4.31 * 10 ⁻⁴	4.39 * 10 ⁻⁷
70	9.59	978	4.02 * 10 ⁻⁴	4.11 * 10 ⁻⁷
75	9.56	975	3.73 * 10 ⁻⁴	3.83 * 10 ⁻⁷
80	9.53	971	3.50 * 10 ⁻⁴	3.60 * 10 ⁻⁷
85	9.50	968	3.30 * 10 ⁻⁴	3.41 * 10 ⁻⁷
90	9.47	965	3.11 * 10 ⁻⁴	3.22 * 10 ⁻⁷
95	9.44	962	2.92 * 10 ⁻⁴	3.04 * 10 ⁻⁷
100	9.40	958	2.82 * 10 ⁻⁴	2.94 * 10 ⁻⁷

Fuente: MOTT, Robert. *Mecánica de fluidos*. p. 589.

El valor interpolado de la densidad del agua a 27,78 grados Celsius es de 996,44 kilogramos por metro cúbico, se sustituye en la fórmula:

$$Q = \left(\frac{6\ 822\ 210,86}{966,44} \right) \frac{\text{m}^3}{\text{h}} = 6\ 846,58 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

Ahora que se conoce el flujo volumétrico en metros cúbicos por hora se debe obtener su equivalente en galones por minuto, los cuales serían 30 143,97 galones por minuto, dado que un metro cúbico por hora equivale a 4,4028 galones por minuto. Este flujo es inyectado durante los días de zafra, aproximadamente 180 días, por lo que el consumo de agua en la situación actual durante la zafra será de 7 813 322 463 galones; esto se obtiene al multiplicar 30 143,97 galones por minuto por los 1 440 minutos de un día y por los 180 días de operación en zafra; el mismo procedimiento se aplica para calcular el consumo total de agua en la situación propuesta y para el consumo de agua de relleno en ambas situaciones, vea tabla XXXIV.

Tabla XXXIV. **Consumo de agua en zafra, condensadores y relleno de torre de enfriamiento**

		Consumo de agua durante zafra	Consumo de agua por minuto
		Galones	Galones
Situación actual	Condensadores	7 813 322 463	30 143,99
	Relleno	158 329 552	610,84
Situación propuesta	Condensadores	3 578 402 168	13 805,56
	Relleno	105 292 567	406,22

Fuente: elaboración propia.

Antes de ser sustituida la pileta de enfriamiento operaba con 4 bombas de 10 000 galones por minuto en el bombeo hacia el ramal de caracoles de aspersión y 4 bombas de la misma capacidad en la inyección de agua de fábrica.

En la situación actual, con la torre de enfriamiento, se opera con 2 bombas de 10 000 galones por minuto y 2 bombas de 7 000 galones por minuto, una de ellas con variador de frecuencia, esto para satisfacer la demanda de 30 143,99 galones por minuto. En la situación propuesta se operara únicamente con 2 bombas de 7 000 galones por minuto para satisfacer la demanda calculada de 13 805,56 galones por minuto.

2.4. Ejecución del proyecto

Para la ejecución del proyecto es necesario definir los parámetros de operación de los sistemas de condensación y enfriamiento, así como establecer la forma en que se monitoreará el flujo de agua.

2.4.1. Establecimiento de parámetros de operación

Después del montaje de la torre de enfriamiento presentado en la sección 2.2. se procede a monitorear las variables de operación del segmento del sistema de recirculación de agua conformado por los condensadores del área de recuperación de sacarosa y dicha torre de enfriamiento del sistema de aguas industriales de fábrica, con esto se obtienen los parámetros actuales.

Estableciendo los parámetros de temperatura de agua de entrada y salida mediante los manuales de operación de la nueva torre de enfriamiento es posible calcular los valores de operación propuestas utilizando balanceos de masa y energía; como se presenta en la sección 2.3., para el sistema de condensación y el sistema de enfriamiento. La tabla XXXV presenta los parámetros de operación actuales y propuestos del agua para el sistema de condensación; en esta se muestra el caudal de agua de inyección que entra al condensador, así como su temperatura a la entrada y salida del mismo.

Tabla XXXV. **Parámetros de operación actuales y propuestos, agua del sistema de condensación**

Condensador	Temperatura de entrada (°F)		Temperatura de salida (°F)		Caudal de inyección (GPM)	
	Actual	Propuesto	Actual	Propuesto	Actual	Propuesto
1	82,00	90,00	93,36	124,00	1 230,30	399,46
2	82,00	90,00	94,13	124,00	2 298,57	797,86
3	82,00	90,00	92,33	124,00	3 893,76	1 149,10
4	82,00	90,00	101,82	124,00	1 719,88	982,18
5	82,00	90,00	105,36	124,00	1 454,00	982,18
6	82,00	90,00	103,38	124,00	1 590,44	981,03
7	82,00	90,00	113,40	124,00	818,26	748,61
8	82,00	90,00	98,93	124,00	1 288,42	626,90
9	82,00	90,00	104,67	124,00	961,99	630,04
10	82,00	90,00	108,56	124,00	819,13	631,03
11	82,00	90,00	105,50	124,00	2 052,11	1 394,52
12	82,00	90,00	112,25	124,00	1 625,64	1 431,20
13	82,00	90,00	88,94	124,00	6 922,01	1 367,34
14	82,00	90,00	109,06	124,00	561,98	441,29
15	82,00	90,00	96,25	124,00	1 158,11	473,07
16	82,00	90,00	97,33	124,00	1 749,39	769,75

Fuente: elaboración propia.

La tabla XXXVI presenta los parámetros de operación del vapor para el sistema de condensación; en esta se muestra el flujo másico de vapor a condensar, temperatura del vapor, entalpía de vapor y calor específico a presión constante, hay que mencionar que las propiedades del vapor a condensar no cambian debido a la incorporación de la torre de enfriamiento, por lo cual los parámetros actuales y propuestos a utilizar son los mismos para el vapor.

Tabla XXXVI. **Parámetros de operación, vapor a condensar**

Condensador	Temperatura de vapor (°F)	Entalpía específica de vapor (KJ/Kg)	Calor específico a presión constante (kJ/Kg*°C)	Flujo másico de vapor (Kg/Hr)
1	152,27	2 620,62	4,18	2 963,34
2	149,13	2 617,63	4,18	5 926,28
3	147,27	2 615,83	4,18	8 541,54
4	147,27	2 615,83	4,18	7 300,80
5	147,27	2 615,83	4,18	7 300,80
6	144,81	2 613,45	4,18	7 299,48
7	156,06	2 624,25	4,18	5 545,14
8	137,00	2 605,90	4,18	4 679,27
9	149,38	2 617,87	4,18	4 679,27
10	152,63	2 620,96	4,18	4 680,56
11	151,06	2 619,47	4,18	10 350,13
12	152,94	2 621,26	4,18	10 614,43
13	160,19	2 628,17	4,18	10 111,80
14	157,93	2 626,04	4,18	3 266,37
15	150,01	2 618,47	4,18	3 512,56
16	154,97	2 623,20	4,18	5 704,20

Fuente: elaboración propia.

La tabla XXXVII presenta los parámetros de operación actuales y propuestos para el sistema de enfriamientos; en esta se presenta dichos parámetros tanto para el agua y aire que circulan en la torre de enfriamiento.

Tabla XXXVII. **Parámetros de operación actuales y propuestos, sistema de enfriamiento**

Variable	Actual	Propuesto
Flujo másico agua de alimentación (Kg/Hr)	6 924 686,82	3 224 641,26
Temperatura de agua de entrada (°C)	41,11	51,11
Temperatura de agua de salida(°C)	27,78	32,22
Temperatura de entrada del aire (°C)	27,25	27,25
Temperatura de salida del aire (°C)	38,53	43,26
Humedad específica del aire (KgH ₂ O/Kg aire)	0,01164	0,01164
Calor específico del aire (KJ/Kg * K)	1,005	1,005
Entalpía específica del aire de entrada (KJ/Kg)	57,03	57,03
Entalpía específica del aire de salida (KJ/Kg)	157,79	200,29
Entalpía específica del agua de entrada(KJ/Kg)	172,17	213,98
Entalpía específica del agua de salida (KJ/Kg)	116,46	135,02
Flujo másico de aire (Kg/Hr)	3 988 518,88	1 863 663,10

Fuente: elaboración propia.

Para reducir el consumo de agua se cambiarán los parámetros de operación de los condensadores de los tachos y la torre de enfriamiento que les suministra el agua.

Los parámetros de temperatura de agua recomendados para reducir los consumos de agua en los sistemas de condensación con base en los cálculos realizados en la sección de metodología de cálculo y las recomendaciones de los manuales de operación presentados igualmente en la misma serían para el flujo de agua que es inyectado al condensador, el cual es el mismo para la temperatura de salida del agua de enfriamiento, de 90 grados Fahrenheit lo cual equivale a 32,22 grados Celsius.

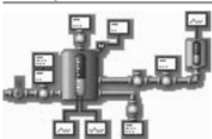



El parámetro de temperatura de agua de salida de la mezcla de condensados que abandonan los condensadores, siendo la misma que la temperatura del flujo de entrada de agua a la torre de enfriamiento, se recomienda ser de 124 grados Fahrenheit, lo cual equivale a 51,11 grados Celsius.

Para poder mantener los parámetros de temperatura presentados anteriormente en los sistemas de condensación y enfriamiento se debe mantener cierto flujo de agua en la inyección de cada uno de los condensadores; este flujo de agua fue calculado anteriormente y la tabla XXXV presenta su valor recomendado para cada uno de los 16 condensadores estudiados en el proyecto. Con base en la tabla XXXVII se observa que en la situación actual se tiene un flujo másico de agua de 6 924 686,82 Kg/Hr y en la situación propuesta de 3 224 641,26 Kg/Hr, esto genera un ahorro de 3 700 045.56 Kg/Hr de agua.

2.4.2. Equipo de medición

Para poder realizar el monitoreo del flujo de agua que se inyecta a cada condensador es necesaria la instalación de medidores de caudal de tipo electromagnético en cada uno de los condensadores barométricos, este tipo de medidor de flujo es de los más confiables para fluidos con impurezas como el que se maneja en estos equipos, la instalación se realizará en la tubería de inyección de cada uno de los condensadores. La tabla XXXVIII presenta algunos medidores de caudal electromagnéticos de marca Siemens, siendo esta una marca confiable que ya se ha utilizado con anterioridad en otros medidores dentro de las instalaciones de Ingenio La Unión.

Tabla XXXVIII. Catálogo de medidor de caudal electromagnético

<p>Para algunos productos puede haber restricciones. Infórmese sobre el estado actual con ayuda de nuestro selector de productos en Internet: www.pia-selector.com/its_main_en.asp</p> 						
	MAG 3100	MAG 3100 HT	MAG 3100 P	MAG 5100 W	MAG 1100	MAG 1100 HT
Sector industrial / área industrial						
Aguas y aguas residuales	XX		X	XXX	XX	
Química	XXX	XXX	XXX	X	XXX	XXX
Industria farmacéutica	XX	XX	XX	X	XX	XX
Alimentos y bebidas	X	X	X	X	XX	
Industrias de minería, cemento y mineral	XXX			X	XX	
Petroquímica	XX	X	XX	X	XX	X
Otros	XX	XX	XX	XX	XX	XX
Forma constructiva						
Compacta	●	●	●	●	●	
Separada	●	●	●	●	●	●
Campo continuo (CC)	●	●	●	●	●	●
Campo alterno (CA)						
Campo continuo (servicio por batería)						
Materiales / temperatura:						
Material del revestimiento / Temperaturas máximas						
Goma dura NBR: 70 °C (158 °F)				●		
EPDM: 70 °C (158 °F)	●					
Neopreno: 70 °C (158 °F)	●			●		
PTFE: 100 °C (212 °F)	●					
PTFE: 130 °C (266 °F)		●	●			
PTFE: 180 °C (356 °F)		●				
Ebonita: 95 °C (203 °F)	●					
Linatex: 70 °C (158 °F)	●					
Cerámica: 150 °C (302 °F)					●	
Cerámica: 200 °C (392 °F)						●
PFA: 100 °C (212 °F)	●					
PFA: 150 °C (302 °F)		●	●		●	
Novolak: 130 °C (266 °F)						
● = disponible						

Continuación de la tabla XXXVIII.

Diámetro nominal						
DN 2 (1/12")					•	
DN 3 (1/8")					•	
DN 6 (1/4")					•	
DN 10 (3/8")					•	
DN 15 (1/2")	•	•	•		•	•
DN 20 (3/4")						
DN 25 (1")	•	•	•	•	•	•
DN 32 (1¼")						
DN 40 (1½")	•	•	•	•	•	•
DN 50 (2")	•	•	•	•	•	•
DN 65 (2½")	•	•	•	•	•	•
DN 80 (3")	•	•	•	•	•	•
DN 100 (4")	•	•	•	•	•	•
DN 125 (5")	•	•	•	•		
DN 150 (6")	•	•	•	•		
DN 200 (8")	•	•	•	•		
DN 250 (10")	•	•	•	•		

Fuente: Siemens AG, Instrumentos para medida de caudal SITRANS F.

http://www.soltechltda.com/index.php?option=com_k2&view=item&layout=item&id=94&Itemid=82&lang=es. Consulta: noviembre de 2014.

El medidor que más se adecúa es el modelo MAG 5100 W debido a que es empleado en agua y agua con impurezas, se encuentra en las dimensiones de diámetro nominal de 10 pulgadas que es la que se necesita y su resistencia a la temperatura es de hasta 158 grados Fahrenheit, la cual es mayor a los 90 grados Fahrenheit en que se manejará la temperatura del agua.

La compra e instalación de los 16 medidores de flujo está contemplado en los gastos presentados en la sección de análisis económico.

2.5. Análisis económico

Es necesario aclarar que en el análisis económico se presentarán únicamente gastos, esto es debido a que el sistema de recirculación de agua empleado por Ingenio La Unión es una medida de protección al medio ambiente dado que con ello se reutiliza el agua en fabrica y no es desechada en los ríos, mantener este sistema es un gasto para dicha empresa, por lo que cualquier mejora en él no generará un ingreso sino una disminución del mismo gasto.

Se realizará el análisis económico con base al valor presente neto (VPN) de la situación anterior al montaje de la torre de enfriamiento, la situación actual y la situación propuesta; a continuación se presentan los gastos respectivos a cada una de las situaciones mencionadas que serán empleados para realizar el análisis económico, el valor presente neto obtenido en cada situación será negativo por lo que como criterio de elección de situación se elegirá el menos negativo.

La tabla XXXIX muestra los gastos anuales involucrados en la operación de la pileta de enfriamiento presentando los dos principales rubros de costo que son el consumo de energía eléctrica y el costo del tratamiento químico del agua, estos costos son representativos de la situación anterior al montaje de la torre de enfriamiento.

Tabla XXXIX. **Gasto de operación por zafra de pileta de enfriamiento**

Recurso	Descripción	Cantidad	Gasto unitario (Q)	Gasto total (Q)
Consumo eléctrico	Bomba 10 000 GPM	8 unidades	2 574 720,00	20 597 760,00
Tratamiento de agua	Sacos de cal	4 320 unidades	31,70	136 944,00
	Relleno de agua	390 666 123 galones	0,003	1 171 998,36
			Total	21 906 702,36

Fuente: elaboración propia.

La tabla XL presenta los gastos en los cuales se incurre por la instalación de la torre de enfriamiento en el sistema de recirculación de agua de Ingenio La Unión; estos engloban los gastos referentes a la mano de obra, compra de materiales de la torre, uso de equipos e instalación de equipos de medición de flujo para monitoreo en condensadores.

Estos gastos serán empleados más adelante como el valor de inversión inicial del proyecto para el análisis económico de la opción propuesta por el proyecto.

Tabla XL. **Gastos de implementación de torre de enfriamiento**

Recurso	Descripción	Cantidad	Gasto unitario (Q)	Gasto total (Q)
Recurso humano local	Soldador	4 unidades	16 000,00	64 000,00
	Ayudante	8 unidades	8 400,00	67 200,00
	Conductor de camión	1 unidad	9 520,00	9 520,00
	Operario de grúa	2 unidades	9 520,00	19 040,00
Trabajos subcontratado	Obra civil	1 unidad	900 000,00	900 000,00
	Montaje mecánico	1 unidad	560 000,00	560 000,00
Equipos y maquinaria	Camiones	2 unidades	14 000,00	28 000,00
	Grúas	2 unidades	20 000,00	40 000,00
	Máquina de soldar	4 unidades	3 648,00	14 592,00
Material Condensadores	Medidor de flujo	16 unidades	15 397,49	246 359,84
	Tornillo 7/8"x5 1/2"	384 unidades	12,00	4 608,00
	Tuerca 7/8"	384 unidades	1,37	526,08
	Bridas	32 unidades	890,00	28 480,00
	Electrodo 6011	160 libras	7,14	1 142,40
	Electrodo 7018	160 libras	8,19	1 310,40

Continuación de la tabla XL.

Material/torre de enfriamiento	Lámina 6'x20'x1/4"	50 unidades	2 975,68	148 784,00
	Varilla HN 3/4"	10 unidades	5,58	55,80
	Varilla hierro negro 1"	3 unidades	8,43	25,29
	Cold rolled 1 1/8"	1 unidad	29,36	29,36
	Tornillos y tuercas	--	--	7 142,24
	Pintura anticorrosiva	30 galones	156,00	4 680,00
	Pintura epóxica	20 galones	222,00	4 440,00
	Catalizador	20 galones	251,00	5 020,00
	Solvente	7 galones	120,00	840,00
	Thinner laca	15 galones	44,30	664,50
	Wype	6 libras	5,95	35,70
	Estructura	1 unidad	4 000 000,00	4 000 000,00
				Total

Fuente: elaboración propia.

La tabla XLI muestra los gastos anuales de operación de la torre de enfriamiento ya instalada en la situación actual, es decir los gastos relacionados con el consumo eléctrico y tratamiento químico del agua con los consumos de agua y parámetros de operación anteriores a la propuesta del proyecto.

Tabla XLI. **Gastos de operación en zafra de torre de enfriamiento, situación actual**

Recurso	Descripción	Cantidad	Gasto unitario (Q)	Gasto total (Q)
Consumo eléctrico	Bomba 10 000 GPM	2 unidades	2 574 720,00	5 149 440,00
	Bomba 7 000 GPM	2 unidades	1 544 832,00	3 089 664,00
	Ventilador	3 unidades	1 287 360,00	3 862 080,00
Tratamiento de agua	Tratamiento químico	--	--	750 000,00
	Relleno de agua	158.329.552 galones	0,003	474 988,65
			Total	13 326 172,65

Fuente: elaboración propia.

La tabla XLII muestra los gastos anuales de operación de la torre de enfriamiento ya instalada en la situación propuesta, es decir los gastos relacionados con el consumo eléctrico y tratamiento químico del agua con los consumos de agua y parámetros de operación propuestos.

Tabla XLII. **Gastos de operación por zafra de torre de enfriamiento, situación propuesta**

Recurso	Descripción	Cantidad	Gasto unitario (Q)	Gasto total (Q)
Consumo eléctrico	Bomba 7 000 GPM	2 unidades	1 544 832,00	3 089 664,00
	Ventilador	3 unidades	1 287 360,00	3 862 080,00
Tratamiento de agua	Tratamiento químico	--	--	750 000,00
	Relleno de agua	105.292.567 galones	0,003	315 877,70
			Total	8 017 621,70

Fuente: elaboración propia.

El tiempo de evaluación del proyecto será de 50 años, dado que este es el tiempo de vida útil de una torre de enfriamiento, para establecer la tasa de interés con la cual se evaluará el proyecto se estima utilizando el modelo CAPM, cuya fórmula es la siguiente:

$$K_s = r_f + \beta(r_m - r_f)$$

Donde:

K_s = rentabilidad exigida a la acción (%)

r_f = tasa libre de riesgo (%)

β = coeficiente beta de la industria

r_m = rentabilidad esperada del mercado (%)

La tasa libre de riesgo es una consideración que en la economía existe una alternativa de inversión que no tiene riesgo para el inversionista, es decir que el capital invertido será recuperado nuevamente; este valor será tomado de estudios económicos realizados para Guatemala en el 2013 que se presentan en la tabla XLIII teniendo valor de 8,32 por ciento.

Tabla XLIII. **Tasa libre de riesgos**

Prima Libre de Riesgo (R_f)		
		GUATEMALA
		%
Rendimiento de los Bonos al año 2013 de Guatemala	ANEXO 5	9.69
Riesgo Soberano	ANEXO 6	(4.63)
Diferencial de Inflación	ANEXO 8	3.27
Prima libre de riesgo (R_f)		8.32

Fuente: RÍOS, Jorge. *Valoración de una empresa comercial por medio del método de flujos de caja libres descontados*. p. 59.

La rentabilidad esperada del mercado es el retorno esperado al invertir en cierta cartera de valores de un mercado; la tabla XLIV presenta el valor considerado para esta variable, siendo de 14,58 por ciento.

Tabla XLIV. **Rentabilidad esperada del mercado**

Prima de Riesgo Mercado (<i>R_m</i>)		GUATEMALA
		%
Prima de riesgo mercado global (EE.UU)	ANEXO 8	3.27
(+) Tasa libre de riesgo de Guatemala (<i>R_f</i>)	ANEXO 9	8.32
(+) Diferencia de rentabilidad exigida por el inversor, sobre prima de mercado global		3.00
(=) Rentabilidad esperada del mercado (<i>R_m</i>)		14.58

Fuente: RÍOS, Jorge. *Valoración de una empresa comercial por medio del método de flujos de caja libres descontados*. p. 59.

La variable faltante es el coeficiente beta de la industria o sector, siendo este la sensibilidad o respuesta del rendimiento de una acción ante las variaciones sufridas en el rendimiento de un mercado. La tabla XLV muestra el Beta sectorial representativo para la industria azucarera que es clasificada en el sector de Agricultura, Silvicultura y Ganadería, siendo este de 0,8.

Tabla XLV. **Coeficiente beta de la industria**

Beta Sectorial	
Agricultura, silvicultura, ganadería	0,8
Minas y canteras	2,9
Industria manufacturera	0,9
Construcción	2,0
Electricidad, gas y agua	1,7
Transporte, almacenamiento y comunicaciones	1,7
Comercio	1,0
Banca, seguros y bienes inmueble	1,6
Vivienda	0,4
Administración pública	0,9
Servicios privados	1,0

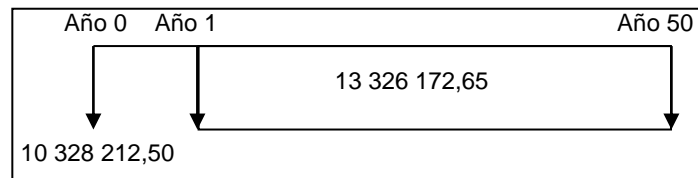
Fuente: CAMAGRO. *Reporte del sector Agro y sus perspectivas*. p. 17.

Con las variables ya definidas es posible sustituir en la fórmula para encontrar el valor de la tasa de interés con la cual se evaluará el proyecto, siendo esta de aproximadamente 14 por ciento.

$$K_s = (8,32 + (0,8) * (14,58 - 8,32))\% = 13,33 \% \approx 14 \%$$

Para realizar el cálculo del valor presente neto para la situación actual se presenta el flujo de efectivo en la figura 28; posterior a esto se debe encontrar el valor que tendría en el presente cada uno de los gastos anuales proyectados en dicha figura, esto se logra multiplicando los valores de las anualidades por factores de la tabla XLVI que dependen de la tasa de interés y las unidades de tiempo.

Figura 28. **Flujo de efectivo, situación actual**



Fuente: elaboración propia.

Se puede encontrar el factor referente a una tasa de interés del 14 por ciento y un período de 50 años para encontrar el valor presente, dada una anualidad (P/A); según la tabla XLVI este tiene un valor de 7,1327; se procede a multiplicar este valor por los gastos anuales.

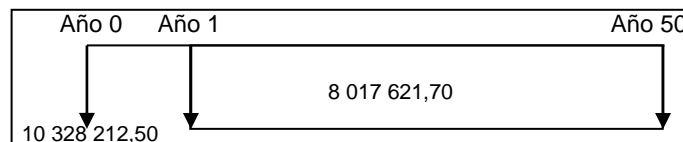
$$\begin{aligned} \text{Valor presente dado una anualidad} &= -Q(13\,326\,172,65 * 7,1327) \\ &= -Q\,95\,051\,591,66 \end{aligned}$$

El dato anterior representa el valor presente en el año cero que tendrían los gastos anuales proyectados en el diagrama de flujo de efectivo en la situación actual, los valores de inversión inicial ya se encuentran en el valor presente por lo tanto solo es necesario sumarlos con el valor calculado.

$$\begin{aligned} \text{Valor Presente Neto}_{\text{Situación actual}} &= -Q (10\,328\,212,50 + 95\,051\,591,66) \\ &= -Q 105\,379\,804,16 \end{aligned}$$

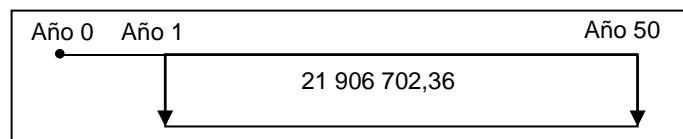
En el caso de la situación actual vemos que presenta un valor presente neto de menos 120 995 413,30 quetzales. Para calcular el valor presente neto del resto de las situaciones estudiadas se repetirá el mismo procedimiento; los flujos de efectivo de la situación propuesta y de la situación en la cual se mantiene en uso la piletta de enfriamiento se presenta en la figuras 29 y 30, respectivamente.

Figura 29. **Flujo de efectivo, situación propuesta**



Fuente: elaboración propia.

Figura 30. **Flujo de efectivo, manteniendo piletta de enfriamiento**



Fuente: elaboración propia.

Tabla XLVI. Flujo de efectivo, factor de interés compuesto al 14 %

14%		Tabla 18 Flujo de efectivo discreto: factores de interés compuesto					14%	
n	Pagos únicos		Pagos de serie uniforme			Gradiente uniforme		
	Cantidad compuesta F/P	Valor presente P/F	Fondo de amortización A/F	Cantidad compuesta F/A	Recuperación de capital A/P	Valor presente P/A	Gradiente de valor presente P/G	Gradiente de serie anual A/G
1	1.1400	0.8772	1.00000	1.0000	1.14000	0.8772		
2	1.2996	0.7695	0.46729	2.1400	0.60729	1.6467	0.7695	0.4673
3	1.4815	0.6750	0.29073	3.4396	0.43073	2.3216	2.1194	0.9129
4	1.6890	0.5921	0.20320	4.9211	0.34320	2.9137	3.8957	1.3370
5	1.9254	0.5194	0.15128	6.6101	0.29128	3.4331	5.9731	1.7399
6	2.1950	0.4556	0.11716	8.5355	0.25716	3.8887	8.2511	2.1218
7	2.5023	0.3996	0.09319	10.7305	0.23319	4.2883	10.6489	2.4832
8	2.8526	0.3506	0.07557	13.2328	0.21557	4.6389	13.1028	2.8246
9	3.2519	0.3075	0.06217	16.0853	0.20217	4.9464	15.5629	3.1463
10	3.7072	0.2697	0.05171	19.3373	0.19171	5.2161	17.9906	3.4490
11	4.2262	0.2366	0.04339	23.0445	0.18339	5.4527	20.3567	3.7333
12	4.8179	0.2076	0.03667	27.2707	0.17667	5.6603	22.6399	3.9998
13	5.4924	0.1821	0.03116	32.0887	0.17116	5.8424	24.8247	4.2491
14	6.2613	0.1597	0.02661	37.5811	0.16661	6.0021	26.9009	4.4819
15	7.1379	0.1401	0.02281	43.8424	0.16281	6.1422	28.8623	4.6990
16	8.1372	0.1229	0.01962	50.9804	0.15962	6.2651	30.7057	4.9011
17	9.2765	0.1078	0.01692	59.1176	0.15692	6.3729	32.4305	5.0888
18	10.5752	0.0946	0.01462	68.3941	0.15462	6.4674	34.0380	5.2630
19	12.0557	0.0829	0.01266	78.9692	0.15266	6.5504	35.5311	5.4243
20	13.7435	0.0728	0.01099	91.0249	0.15099	6.6231	36.9135	5.5734
21	15.6676	0.0638	0.00954	104.7684	0.14954	6.6870	38.1901	5.7111
22	17.8610	0.0560	0.00830	120.4360	0.14830	6.7429	39.3658	5.8381
23	20.3616	0.0491	0.00723	138.2970	0.14723	6.7921	40.4463	5.9549
24	23.2122	0.0431	0.00630	158.6586	0.14630	6.8351	41.4371	6.0624
25	26.4619	0.0378	0.00550	181.8708	0.14550	6.8729	42.3441	6.1610
26	30.1666	0.0331	0.00480	208.3327	0.14480	6.9061	43.1728	6.2514
27	34.3899	0.0291	0.00419	238.4993	0.14419	6.9352	43.9289	6.3342
28	39.2045	0.0255	0.00366	272.8892	0.14366	6.9607	44.6176	6.4100
29	44.6931	0.0224	0.00320	312.0937	0.14320	6.9830	45.2441	6.4791
30	50.9502	0.0196	0.00280	356.7868	0.14280	7.0027	45.8132	6.5423
31	58.0832	0.0172	0.00245	407.7370	0.14245	7.0199	46.3297	6.5998
32	66.2148	0.0151	0.00215	465.8202	0.14215	7.0350	46.7979	6.6522
33	75.4849	0.0132	0.00188	532.0350	0.14188	7.0482	47.2218	6.6998
34	86.0528	0.0116	0.00165	607.5199	0.14165	7.0599	47.6053	6.7431
35	98.1002	0.0102	0.00144	693.5727	0.14144	7.0700	47.9519	6.7824
40	188.8835	0.0053	0.00075	1342.03	0.14075	7.1050	49.2376	6.9300
45	363.6791	0.0027	0.00039	2590.56	0.14039	7.1232	49.9963	7.0188
50	700.2330	0.0014	0.00020	4994.52	0.14020	7.1327	50.4375	7.0714
55	1348.24	0.0007	0.00010	9623.13	0.14010	7.1376	50.6912	7.1020
60	2595.92	0.0004	0.00005	18535	0.14005	7.1401	50.8357	7.1197

Fuente: BLANK, Leland; TARQUIN, Anthony. *Ingeniería económica*. p. 706.

Las tablas XLVII, XLVIII y XLIX presentan los datos de valor presente neto de la situación actual, la situación propuesta y la situación en la que se mantiene utilizando la piletta de enfriamiento.

Tabla XLVII. **Valor presente neto, situación actual**

Descripción	Tiempo (año)	Valor (Q)	Factor	Valor presente neto (Q)
Inversión inicial	0	- 10 328 212,50	1	-10 328 212,50
Presente dado anualidad	50	- 13 326 172,65	7,1327	-95 051 591,66
VPN total				-105 379 804,16

Fuente: elaboración propia.

Tabla XLVIII. **Valor presente neto, situación propuesta**

Descripción	Tiempo (año)	Valor (Q)	Factor	Valor presente neto (Q)
Inversión inicial	0	-10 328 212,50	1	-10 328 212,50
Presente dado anualidad	50	-8 017 621,70	7,1327	-57 187 290,30
VPN total				-67 515 502,80

Fuente: elaboración propia.

Tabla XLIX. **Valor presente neto, manteniendo pileta de enfriamiento**

Descripción	Tiempo (año)	Valor (Q)	Factor	Valor presente neto (Q)
Presente dado anualidad	50	-21 906 702,36	7,1327	-156 253 935,90
VPN total				-156 253 935,90


Fuente: elaboración propia.

Con base en los resultados de valor presente neto (VPN) observados para las opciones presentadas en las tablas XLVII, XLVIII y XLIX se puede establecer que la opción con el mejor valor presente neto (VPN); en este caso el menos negativo es la opción presentada para la situación propuesta. De esta manera se respalda la implementación del proyecto respecto de las otras opciones descritas, en la fecha de elaboración del proyecto el cambio del dólar se encuentra a 7,60 quetzales por 1 dólar.

2.6. Manuales

El sistema de aguas industriales de fábrica cuenta con manuales de operación y dosificación de químicos pero carecen de manuales de mantenimiento correctivo que los apoye en la identificación y solución de desperfectos en la estructura y equipos de las torres de enfriamiento. El siguiente manual es una propuesta para dicha función. Ver figura 31.

Figura 31. **Manual de inspección y mantenimiento correctivo para estructura y equipos de torre de enfriamiento**

	MANTENIMIENTO INGENIO LA UNIÓN		
	Tipo de mantenimiento:	Edición:	01
	Correctivo	Página:	1 de 6
Área:	Proceso:	Equipo:	
Sistema de aguas industriales de fábrica	Enfriamiento y tratamiento de agua	Torre de enfriamiento	

1. Manual de inspección y mantenimiento correctivo de estructura y equipos de torres de enfriamiento

Este manual es una guía rápida que presenta las medidas de mantenimiento correctivo de los diferentes componentes de la torre de enfriamiento con base en la inspección visual de la misma que justifique su intervención.

La aplicación de las diferentes medidas correctivas se puede adaptar a los diferentes tipos de torre de enfriamiento dado que se contemplan aspectos generales que se pueden encontrar en las mismas.

1.1. Depósito de distribución de agua caliente


1.1.1. Inspección visual del área

Colocarse en la parte superior de la torre de enfriamiento y visualizar si se presentan canalizaciones de agua en ciertas zonas, el agua debe verse distribuida uniformemente en toda el área.

1.1.2. Efectos en la operación

Si la distribución del agua no se encuentra uniforme en toda el área se presentaran los siguientes efectos en la operación:

Continuación de la figura 31.

	MANTENIMIENTO INGENIO LA UNIÓN		
	Tipo de Mantenimiento:	Edición:	01
	Correctivo	Página:	2 de 6
Área:	Proceso:	Equipo:	
Sistema de aguas industriales de fábrica	Enfriamiento y tratamiento de agua	Torre de enfriamiento	

- Incremento del consumo de energía eléctrica y de agua
- Reducción en la capacidad de enfriamiento
- Daño físico al empaque y mallas de soporte

1.1.3. Medidas correctivas


- Limpiar el depósito de agua caliente eliminando toda suciedad, algas o basura que pueda tapar las boquillas.
- Limpiar boquillas tapadas mediante su remoción y utilizando herramientas de cerdas plásticas. No utilizar varillas metálicas.
- Sustituir las boquillas que se encuentren dañadas. Instalar boquillas y restrictores de flujo de acuerdo al diseño.

1.2. Relleno de torre de enfriamiento

1.2.1. Inspección visual del área

Visualizar los costados para verificar si se presentan faltantes de relleno en secciones de la torre, suciedad en el relleno, relleno caído o desalineado.

Continuación de la figura 31.

	MANTENIMIENTO INGENIO LA UNIÓN		
	Tipo de Mantenimiento:	Edición:	01
	Correctivo	Página:	3 de 6
Área:	Proceso:	Equipo:	
Sistema de Aguas Industriales de Fabrica	Enfriamiento y Tratamiento de agua	Torre de Enfriamiento	

Otro buen indicador es la presencia de espuma saliendo por los cilindros de la torre, esto es debido a que el inducido succiona la espuma formada por el agua a través de los orificios en la secciones donde es relleno ya no está cumpliendo su función correctamente y son lanzados fuera de la torre debido al flujo de aire.

1.2.2. Efectos en la operación

- Incremento del consumo de energía eléctrica y de agua
- Reducción en la capacidad de enfriamiento

1.2.3. Medidas correctivas


- Instalar el relleno faltante o desalineado de acuerdo con el diseño
- Realizar limpieza del relleno utilizando agua a presión

1.3. Eliminadores de rocío

1.3.1. Inspección visual del área

Colocarse frente a la torre de enfriamiento y visualizar si se presentan lluvias o brisas constantes en los alrededores de la misma. No deben presentarse estas anomalías.

Continuación de la figura 31.

	MANTENIMIENTO INGENIO LA UNIÓN		
	Tipo de Mantenimiento:	Edición:	01
	Correctivo	Página:	4 de 6
Área:	Proceso:	Equipo:	
Sistema de Aguas Industriales de Fabrica	Enfriamiento y Tratamiento de agua	Torre de Enfriamiento	

1.3.2. Efecto en la operación

- Reducción en la capacidad de enfriamiento
- Pérdidas de agua por arrastre

1.3.3. Medidas correctivas


- Instalar las secciones faltantes o dañadas de eliminadores de rocío de acuerdo con el diseño.
- Instalar adecuadamente los sellos de aire entre las secciones de uniones tanto de los eliminadores como de la pared de la torre, con base en el diseño.

1.4. Estructura de madera

1.4.1. Inspección visual del área

Verificar la estructura de la torre de enfriamiento por fuera y por dentro en búsqueda de secciones de la estructura desgastadas, zonas de la estructura con coloraciones negras, desprendimiento de secciones de la estructura, tomillería de uniones corroídas y oxidadas.

Continuación de la figura 31.

	MANTENIMIENTO INGENIO LA UNIÓN		
	Tipo de Mantenimiento:	Edición:	01
	Correctivo	Página:	5 de 6
Área:	Proceso:	Equipo:	
Sistema de Aguas Industriales de Fabrica	Enfriamiento y Tratamiento de agua	Torre de Enfriamiento	


1.4.2. Efectos en la operación

- Movimiento total de la torre.
- Desplome de la torre y paro de las plantas de proceso a las que suministra agua de enfriamiento.
- Daños materiales y humanos.

1.4.3. Medidas correctivas

- Sustituir los elementos estructurales que se encuentre dañados o con signos de deterioro avanzada. Se puede realizar una prueba de penetración utilizando un punzón para encajarlo en las secciones que se consideren deterioradas, si el punzón entra con facilidad cambiar de inmediato la sección estructural. Toda la madera empleada en la sustitución de los elementos estructurales debe ser madera tratada.
- Sustituir los conectores o tomillería que se encuentre incompleta o en mal estado debido a la corrosión. Se recomienda utilizar únicamente tomillería de acero inoxidable.

Continuación de la figura 31.

	MANTENIMIENTO INGENIO LA UNIÓN		
	Tipo de Mantenimiento:	Edición:	01
	Correctivo	Página:	6 de 6
Área:	Proceso:	Equipo:	
Sistema de Aguas Industriales de Fabrica	Enfriamiento y Tratamiento de agua	Torre de Enfriamiento	

1.5. Elementos mecánicos

1.5.1. Inspección visual del área

Colocarse en la parte superior de la torre de enfriamiento en el nivel de los ventiladores, observe si existen oscilaciones excesivas en los equipos mecánicos que integran el inducido de la torre.

1.5.2. Efectos en la operación

- Movimiento de torre de enfriamiento
- Incremento en consumo eléctrico
- Disparo de motores eléctricos

1.5.3. Medidas correctivas

- Balanceo y alineación de la transmisión mecánica de los ventiladores.
- Apriete correcto de tornillería de anclaje de elementos mecánicos con torre de enfriamiento, con base en especificaciones del fabricante.
- Corrección (si es necesaria) del ángulo de inclinación de las aspas del ventilador, con base en especificaciones del fabricante.

Fuente: elaboración propia.

3. FASE DE INVESTIGACIÓN. PROPUESTA PARA LA REDUCCIÓN DEL USO DE AGUA


3.1. Diagnóstico de la situación actual

Para la propuesta de reducción del uso de agua se ha elegido el área de fabricación, esta consta del personal de clarificación, evaporación y recuperación de sacarosa de Ingenio La Unión.

Se considera el periodo de reparación que consta de mediados de abril a mediados de noviembre para generar la reducción de agua en alguna actividad cotidiana del área mencionada, se realizaron entrevistas al personal encargado para conocer donde se dan estos consumos de agua. La figura 32 presenta el formato de encuesta utilizado.

Se entrevistó empleando la encuesta anterior al personal del área de fabricación, para ello se obtuvo una muestra conformada por 80 individuos, la forma en que se calculó dicha muestra se mostrará más adelante y estos valores se encuentran en la tabla LII. La información obtenida utilizando la encuesta anterior se presentan en la tabla L.

Figura 32. **Encuesta área de fabricación**



Encuesta

Objetivo:
Conocer las diferentes actividades donde existe consumo de agua en el área de fabricación.

Instrucciones:
Responda de forma clara y sencilla. No colocar su nombre en esta encuesta, la información proporcionada será únicamente para fines de estudio.

1. ¿Cuáles son las actividades cotidianas que realiza en su área de trabajo que requieran consumo de agua?

2. ¿En qué actividad mencionada considera que podría utilizarse una cantidad de agua menor para realizarla?

Fuente: elaboración propia.

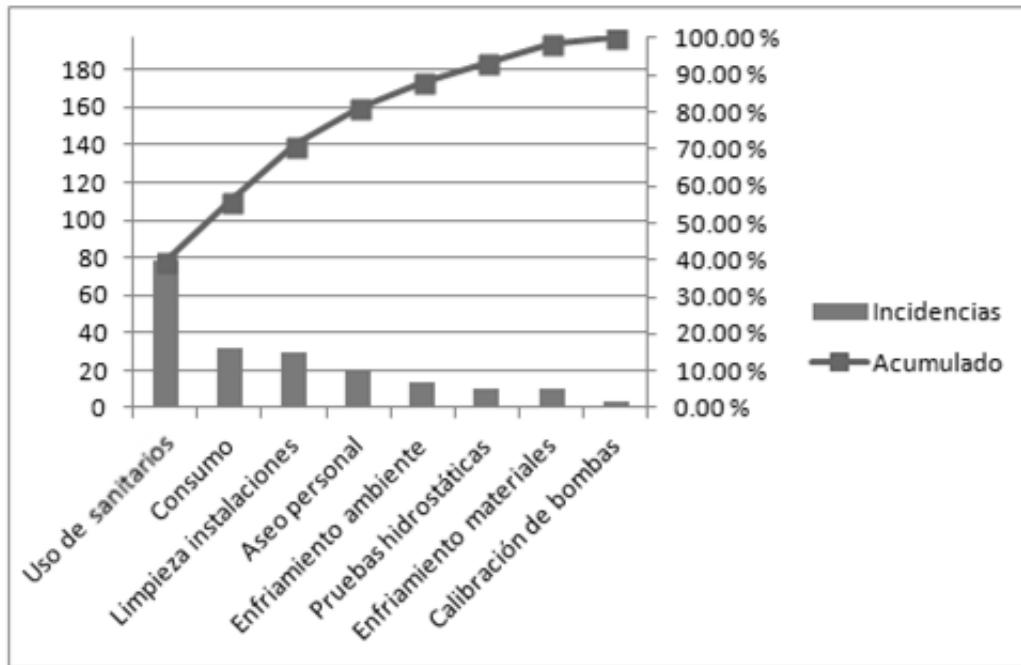
Para poder observar de mejor manera las actividades en las cuales existe con mayor frecuencia consumo de agua por parte de los operarios del área de fabricación se emplea el diagrama de Pareto presentado en la figura 33; en este se puede apreciar que el uso de sanitarios es la actividad más reportada, en la cual su frecuencia porcentual es de 39,59 por ciento.

Tabla L. Datos tabulados de encuesta, área de fabricación

Pregunta 1			
Descripción	Histograma	Frecuencia	Frecuencia porcentual (%)
Limpieza instalaciones		30	15,23
Pruebas hidrostáticas		10	5,08
Uso de sanitarios		78	39,59
Aseo personal		20	10,15
Enfriamiento materiales		10	5,08
Enfriamiento ambiente		14	7,11
Consumo		32	16,24
Calibración de bombas		3	1,52
Pregunta 2			
Descripción	Histograma	Frecuencia	Frecuencia porcentual (%)
Limpieza instalaciones		23	27,38
Pruebas hidrostáticas		10	11,90
Uso de sanitarios		30	35,71
Aseo personal		19	22,62
Enfriamiento materiales		2	2,38
Consumo		0	0,00
Enfriamiento ambiente		0	0,00
Calibración de bombas		0	0,00

Fuente: elaboración propia.

Figura 33. Diagrama de pareto, área de fabricación

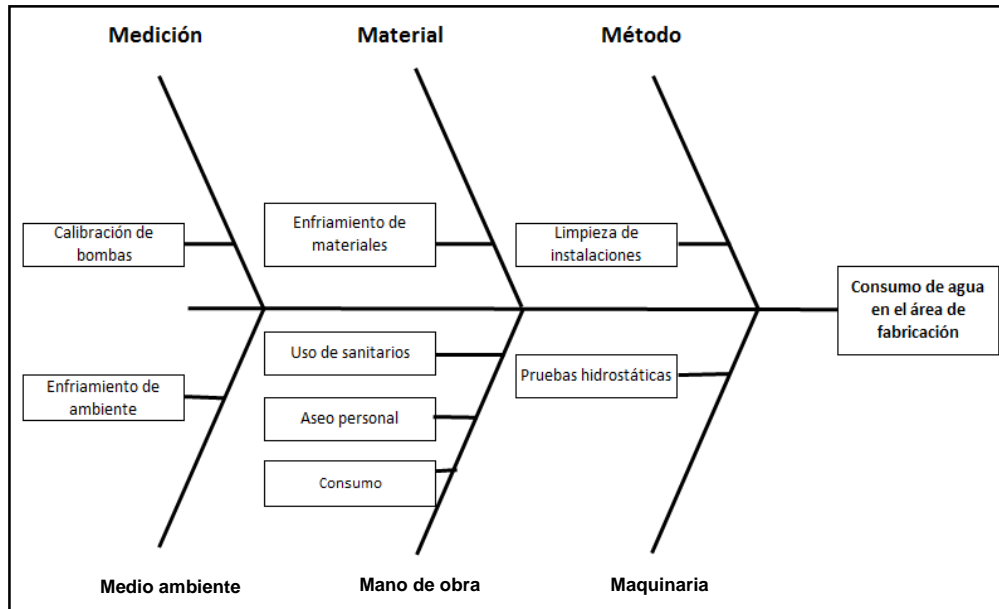


Fuente: elaboración propia.

Se puede observar con base en el diagrama anterior que las actividades que conllevan mayor uso de agua en el área de fabricación son el uso de sanitarios, consumo del personal y limpieza de las instalaciones.

La figura 34 muestra la recopilación y clasificación de las causas de consumo de agua en esta área, las cuales fueron obtenidas mediante observación y colaboración del personal que labora en la misma.

Figura 34. Diagrama Ishikawa, consumo de agua en fabricación



Fuente: elaboración propia.

Se puede observar con base en el diagrama anterior que el consumo de agua más frecuente en el Área de Fabricación se da en la limpieza de instalaciones, pruebas hidrostáticas o de fugas en los equipos y el uso de baños por parte del personal involucrado, siendo la elección más práctica la disminución en el uso de agua en los inodoros de esta área.

Se pretende conocer el consumo de agua referente al uso de inodoros y para ello se ha de realizar un muestreo aleatorio simple estratificado de la población de esta área; este consiste en la identificación de estratos o grupos que integran la población total; en este caso el personal operativo y el de oficina, los cuales tienen la misma probabilidad de ser elegidos como parte de la muestra.

La siguiente expresión ayudará a encontrar una muestra representativa para una población finita que facilite el trabajo de recolección de información.

$$n = \frac{Z^2 * N * p * q}{i^2 * (N - 1) + Z^2 * p * q}$$

Donde:

n = tamaño de muestra

N = tamaño de la población

Z = valor correspondiente a la distribución de Gauss

p = prevalencia esperada del parámetro a evaluar

q = complemento de la prevalencia esperada del parámetro a evaluar

i = error esperado

Dado que se pretende evaluar los dos estratos de la población se calculara el tamaño de muestra para cada uno de ellos. La tabla LI presenta el tamaño de la población del área de fabricación para el periodo de reparación.

Tabla LI. **Tamaño de población, área de fabricación**

	Cantidad de personal durante reparación
Oficina	30
Fabricación	133

Fuente: elaboración propia.

Para calcular el tamaño de muestra del estrato de población referente al personal que trabaja en oficina del área de fabricación se emplea el tamaño de la población presentado en la tabla LI; se trabajará con un rango de confianza del 95 por ciento por, lo que el valor correspondiente a la distribución de Gauss será de 1,96.

El valor de prevalencia esperada del parámetro a evaluar es el porcentaje de probabilidad de que ocurra el resultado deseado, dado que no se cuenta con estudios anteriores que puedan servir de referencia; para establecer este mismo se empleará un valor de 0,50 debido a que este entrega el mayor tamaño de muestra, el inverso de la prevalencia anterior en este caso será de 0,50; esto quiere decir que la probabilidad de que ocurra o no el resultado deseado es la misma.

El valor del error esperado pretende ser 0,10; esto es debido a que se espera mediante el establecimiento de este valor poder incluir factores tales como la inexperiencia del encuestador y la posible influencia del mismo sobre las respuestas de los entrevistados, se procede a sustituir en la fórmula.

$$n = \frac{1,96^2 * 30 * 0,50 * 0,50}{0,10^2 * (30 - 1) + 1,96^2 * 0,50 * 0,50} = 23.04 \approx 24$$

El valor de tamaño de muestra del grupo de personal de oficina será de 24; para obtener el valor de tamaño de muestra para el grupo de operarios se repetirá el mismo procedimiento. La tabla LII muestra el resumen de los resultados del tamaño de muestra de los dos grupos del área de fabricación estudiados.

Tabla LII. **Tamaño de muestra, área de fabricación**

	Tamaño de muestra
Oficina	24
Fabricación	56

Fuente: elaboración propia.

Para obtener el valor de consumo de agua empleado en los inodoros por el personal del área de fabricación se realizaron entrevistas a dicho personal mediante el empleo de una encuesta. La figura 35 muestra el formato de la encuesta utilizado.


La tabla LIII muestra los datos tabulados de las respuestas otorgadas por el personal entrevistado.

Tabla LIII. **Datos tabulados de la encuesta**

	Pregunta 1						Pregunta 2	
	1	2	3	4	5	Más de 5	Sí	No
Oficina	5	15	4	0	0	0	5	19
Fabricación	34	22	0	0	0	0	3	53

Fuente: elaboración propia.

Figura 35. **Formato de encuesta**



**INGENIO
LA UNIÓN**
Responsabilidad & Desarrollo

Encuesta

Objetivo:
Conocer cuántas veces al día hacen uso del inodoro los empleados del área de fabricación y saber si poseen conocimiento acerca de la utilización de inodoros de doble descarga.

Instrucciones:
Marque con una "X" la casilla correspondiente a su respuesta. No coloque su nombre en esta encuesta, la información proporcionada será únicamente para fines de estudio.

1) ¿Cuántas veces al día utiliza el inodoro?

1 <input type="checkbox"/>	4 <input type="checkbox"/>
2 <input type="checkbox"/>	5 <input type="checkbox"/>
3 <input type="checkbox"/>	más de 5 <input type="checkbox"/>

2) ¿Conoce cómo se utilizan los sistemas de descarga dividida o descarga ahorradora en los inodoros?

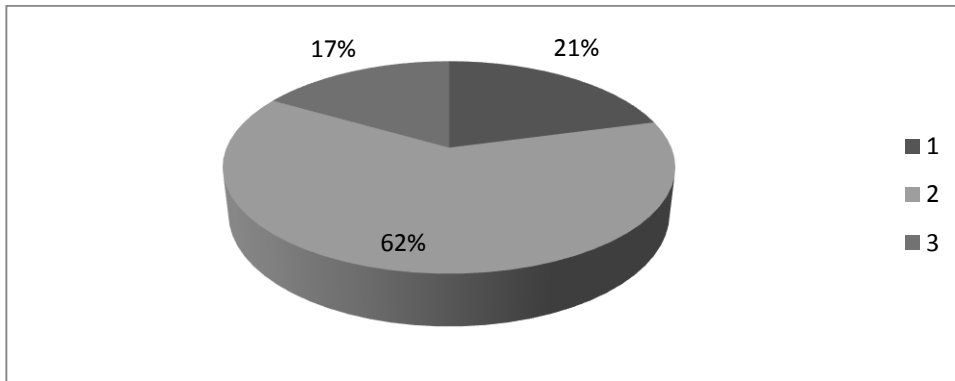
Sí

No

Fuente: elaboración propia.

Las figuras 36, 37, 38 y 39 presentan los gráficos de pastel referente a cada una de las preguntas de la encuesta para cada grupo estudiado; los datos recopilados se considerarán representativos de la población total del personal del área de fabricación.

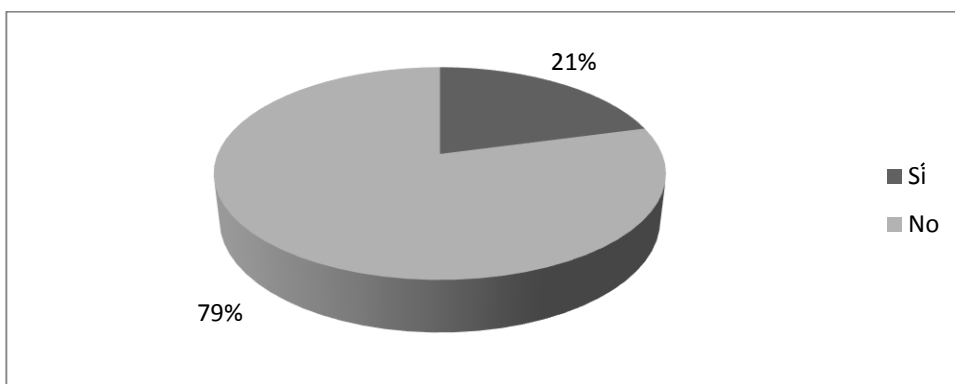
Figura 36. **Frecuencia de uso de inodoros en oficinas**



Fuente: elaboración propia.

La figura 36 muestra que el 21 por ciento de la población de oficina del área de fabricación utiliza los inodoros 1 vez al día, el 62 por ciento los utiliza 2 veces al día y el 17 por ciento 3 veces al día.

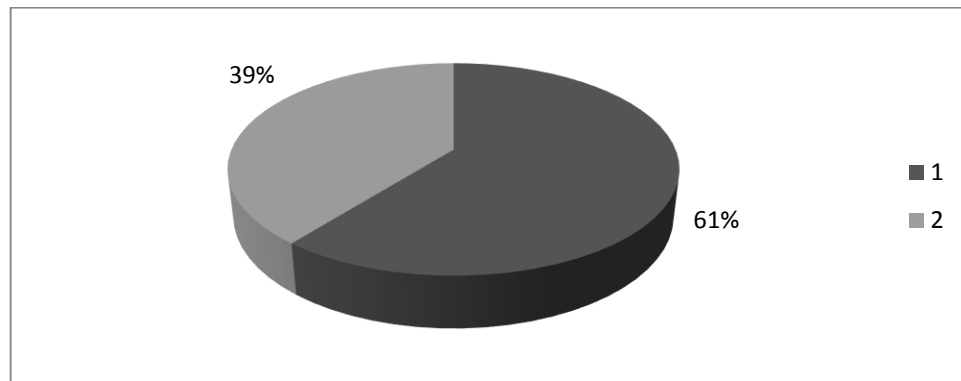
Figura 37. **Conocimiento de inodoros de doble descarga en oficinas**



Fuente: elaboración propia.

La figura 37 muestra que el 21 por ciento de la población de oficina del área de fabricación posee cierto conocimiento del uso de inodoros de doble descarga y el 79 por ciento desconoce cómo utilizarlos.

Figura 38. **Frecuencia de uso de inodoros en área de fabricación**

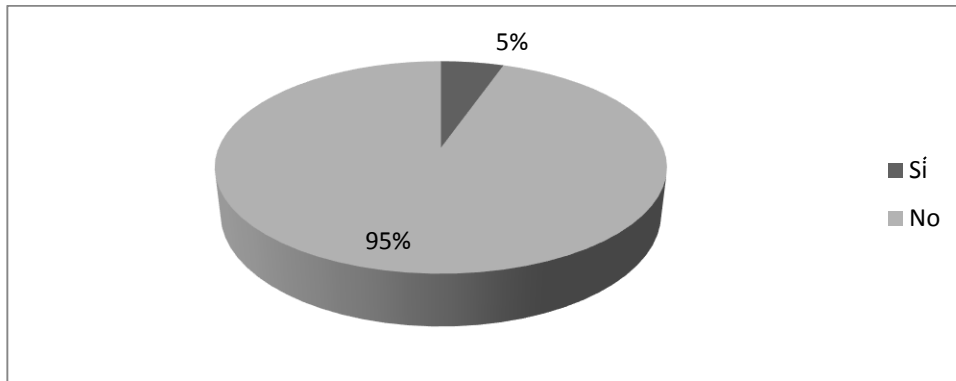


Fuente: elaboración propia.

La figura 38 muestra que el 61 por ciento de la población de operarios del área de fabricación utiliza los inodoros 1 vez al día y 39 por ciento 2 veces al día.

La figura 39 muestra que solo el 5 por ciento de la población de operarios del área de fabricación posee cierto conocimiento del uso de inodoros de doble descarga y el 95 por ciento desconoce cómo utilizarlos.

Figura 39. **Conocimiento de inodoros de doble descarga en fabricación**



Fuente: elaboración propia.

El estudio realizado del consumo de agua en inodoros del Área de Fabricación es válido únicamente para el periodo de reparación, dado que en época de zafra la cantidad de personal se incrementa.

3.1.1. Análisis del consumo de agua

Empleando la información obtenida de la encuesta realizada es posible estimar la cantidad de agua utilizada en los inodoros del área de fabricación en el periodo de reparación por parte del personal de dicha área.

3.1.1.1. Consumo de agua en sanitarios

La tabla LIV muestra el consumo de agua actual que existe en el área de fabricación durante el periodo de reparación de fábrica; esta se ha estimado multiplicando la cantidad de personas por el número de descargas que realizan al día por la cantidad de litros que posee una descarga.

Para estimar el número de galones empleados en el uso de inodoros en el periodo de reparación se considera una duración del mismo de 180 días.

Tabla LIV. **Consumo de agua en sanitarios, actual**

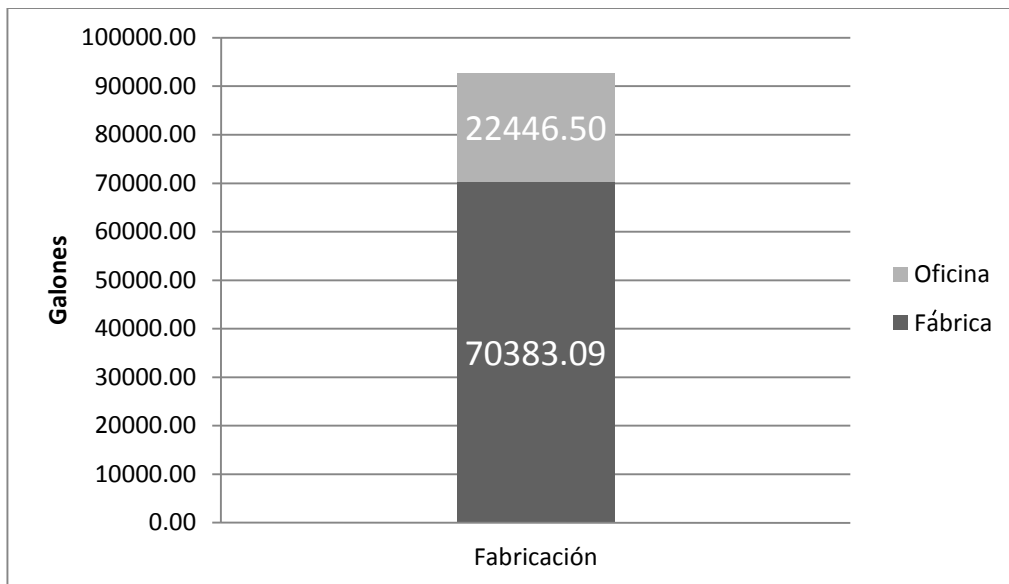
	Descargas	Porcentaje	Cantidad de personas	Cantidad de agua por descarga	Cantidad de agua utilizada	Cantidad de agua utilizada
		%		Litros por descarga	Litros al día	Galones por reparación
Oficina	1	21,00	6,00	8,00	48,00	2 282,69
	2	62,00	19,00	8,00	304,00	14 457,07
	3	17,00	5,00	8,00	120,00	5 706,74
	4	0,00	0,00	8,00	0,00	0,00
	5	0,00	0,00	8,00	0,00	0,00
	Más de 5	0,00	0,00	8,00	0,00	0,00
Fabricación	1	61,00	81,00	8,00	648,00	30 816,38
	2	39,00	52,00	8,00	832,00	39 566,71
	3	0,00	0,00	8,00	0,00	0,00
	4	0,00	0,00	8,00	0,00	0,00
	5	0,00	0,00	8,00	0,00	0,00
	Más de 5	0,00	0,00	8,00	0,00	0,00
Total					1 952,00	92 829,59

Fuente: elaboración propia.

3.1.1.2. Representación grafica de consumo de agua

La figura 40 presenta el gráfico comparativo del consumo de agua en los sanitarios en el periodo de reparación por parte del personal del área de fabricación.

Figura 40. Consumo de agua en sanitarios, área de fabricación



Fuente: elaboración propia.

El área de fabricación posee un consumo de agua en los sanitarios de 92 829,59 galones durante el periodo de reparación.

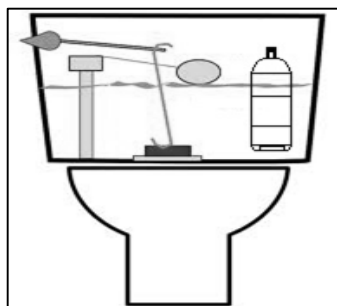
3.2. Propuesta de reducción de consumo de agua

Para la reducción en el consumo de agua de los inodoros del Área de Fabricación se ha optado por aminorar la cantidad de agua que se emplea en cada descarga para lograr pequeños ahorros en cada uso, la forma en que se realizará esta reducción de descarga y la estimación del nuevo consumo que se tendría en dicha área se presenta a continuación.

3.2.1. Plan de acción para reducción de consumo de agua

La propuesta de reducción de consumo de agua en sanitarios consiste en el empleo de volúmenes muertos, en este caso botellas plásticas de 600 mililitros, colocados dentro del depósito de los baños del Área de Fabricación; este volumen no podrá ser empleado durante las descargas de los baños por lo que el ahorro por descarga será igual al volumen contenido dentro de las botellas plásticas. Los depósitos de estos baños tienen una capacidad de 8 litros por lo que colocar una botella plástica de 600 mililitros hará que el baño utilice por descarga 7,4 litros. La figura 41 presenta el esquema de cómo quedaría el arreglo para la propuesta de ahorro de agua por descarga.

Figura 41. **Esquema de arreglo para ahorro de agua**



Fuente: elaboración propia, utilizando Microsoft Word.

La figura 42 muestra el formato de cartel elaborado para ser colocado en los baños que cuenten con sistemas de descarga doble; esto debido a que con base en los datos obtenidos en las encuestas los operarios desconocen en su mayoría el modo de utilizar este tipo de descargas.

Figura 42. **Formato de cartel, modo de uso de descargas dobles**



Fuente: elaboración propia, utilizando Microsoft Word.

3.2.2. Nuevo consumo de agua

La tabla LV muestra el consumo de agua que se tendría con la implementación de los volúmenes muertos de 600 mililitros dentro de los depósitos de 8 litros de los baños del Área de Fabricación.

Tabla LV. Consumo de agua en sanitarios, propuesta

	Descargas	Porcentaje	Personas	Agua descarga	Agua utilizada	Agua utilizada
	Unidad	%	Unidad	Litros descarga	Litros al día	Galones por reparación
Oficina	1	21,00	6,00	7,40	44,40	2 111,49
	2	62,00	19,00	7,40	281,20	13 372,79
	3	17,00	5,00	7,40	111,00	5 278,73
	4	0,00	0,00	7,40	0,00	0,00
	5	0,00	0,00	0,00	7,40	0,00
	Más de 5	0,00	0,00	0,00	7,40	0,00
Fabricación	1	61,00	81,00	7,40	599,40	28 505,15
	2	39,00	52,00	7,40	769,60	36 599,21
	3	0,00	0,00	7,40	0,00	0,00
	4	0,00	0,00	0,00	7,40	0,00
	5	0,00	0,00	0,00	7,40	0,00
	Más de 5	0,00	0,00	0,00	7,40	0,00
				Total	1 805,60	85 867,37

Fuente: elaboración propia.

3.2.3. Costo para implementación

Esta opción de ahorro empleara material reciclado (botellas plásticas de 600 mililitros) y no es necesario ningún tipo de modificación en los depósitos de los baños del área de fabricación, basta con colocarlas cuidando que no impidan el movimiento del flotador del depósito o del obturador de las descargas; la tabla LVI presenta los costos de implementación de esta propuesta.

Tabla LVI. **Costo de implementación, propuesta de reducción de consumo de agua**

Descripción	Cantidad	Costo unitario (Q)	Costo total (Q)
Botella de 600 ml reciclada	10	0,02	0,20
Instalación	10	3,50	35,00
		Total	35,20

Fuente: elaboración propia.

3.2.4. Ahorro por implementación

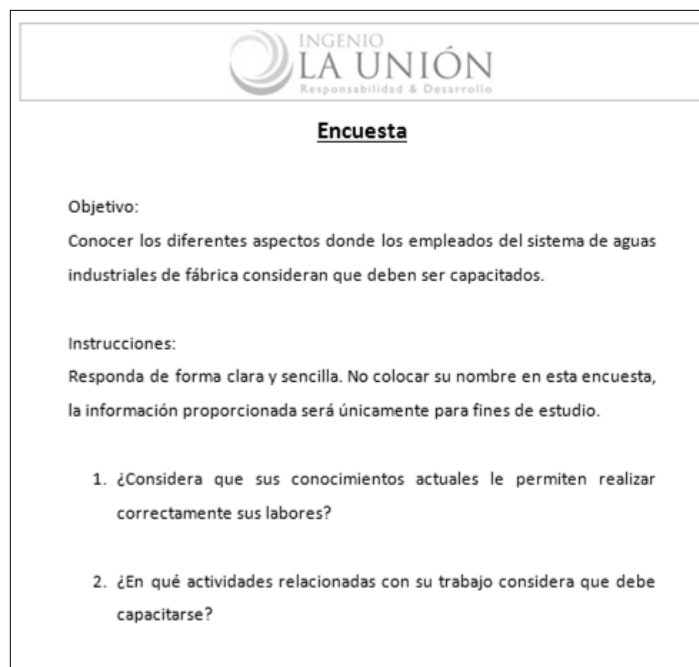
Como se puede observar en la tabla LIV y tabla LV el consumo de agua en el periodo de reparación para los sanitarios del Área de Fabricación actualmente y para la propuesta de ahorro son respectivamente 92 829,59 galones y 85 867,67 galones. El ahorro en galones de agua sería de 6 962,22 galones durante el periodo de reparación.

4. FASE DE DOCENCIA

4.1. Diagnóstico de necesidad de capacitación

Para la realización de las capacitaciones se ha elegido al personal operativo del sistema de aguas industriales de fabrica, el cual está integrado por 6 operarios. Se ha optado para la identificación de las necesidades de capacitación el realizar una encuesta; esta resulta en una forma rápida y fácil de formulación de las temáticas que los operarios consideran prioritarias, el formato utilizado se presenta en la figura 43.

Figura 43. Encuesta necesidad de capacitación sistema de agua



The image shows a survey form titled "Encuesta" (Survey) from "INGENIO LA UNIÓN Responsabilidad & Desarrollo". The form is enclosed in a rectangular border and contains the following text:

INGENIO LA UNIÓN
Responsabilidad & Desarrollo

Encuesta

Objetivo:
Conocer los diferentes aspectos donde los empleados del sistema de aguas industriales de fábrica consideran que deben ser capacitados.

Instrucciones:
Responda de forma clara y sencilla. No colocar su nombre en esta encuesta, la información proporcionada será únicamente para fines de estudio.

1. ¿Considera que sus conocimientos actuales le permiten realizar correctamente sus labores?

2. ¿En qué actividades relacionadas con su trabajo considera que debe capacitarse?

Fuente: elaboración propia.

La información obtenida de los 6 operarios entrevistados utilizando la encuesta anterior se presenta en la tabla LVII.

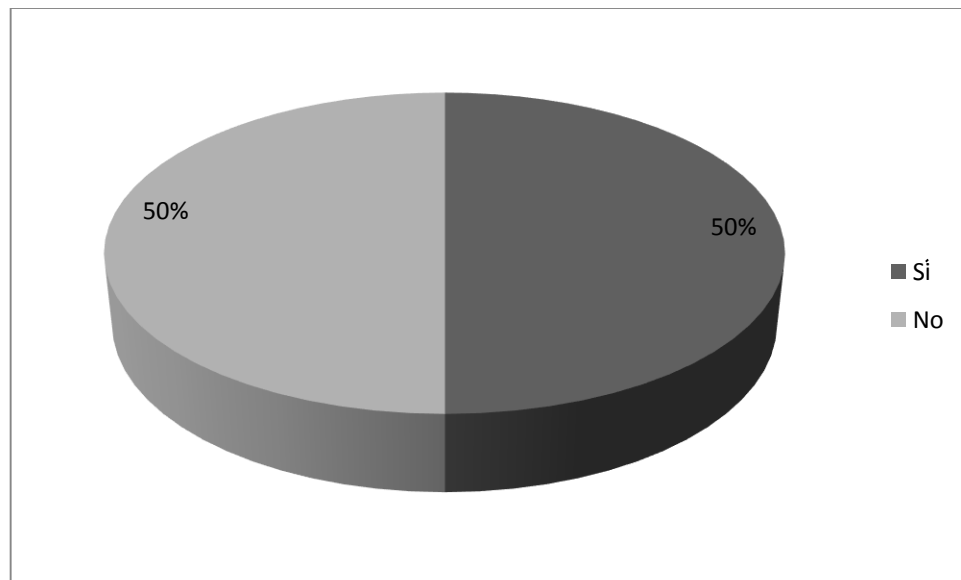
Tabla LVII. **Capacitación sistema de aguas industriales de fábrica**

Pregunta 1			
Descripción	Histograma	Frecuencia	Frecuencia porcentual (%)
Sí	III	3	50,00
No	III	3	50,00
Pregunta 2			
Descripción	Histograma	Frecuencia	Frecuencia porcentual (%)
Calibración de medidores	I	1	4,76
Mantenimiento correctivo	IIIIII	6	28,57
Mantenimiento preventivo	II	2	9,52
Seguridad industrial	II	2	9,52
Primeros auxilios	I	1	4,76
Funcionamiento de ventiladores	I	1	4,76
Soldadura	I	1	4,76
Conversión de unidades de medida	IIIIII	6	28,57
Calibración de bombas	I	1	4,76

Fuente: elaboración propia.

Con base en la información recopilada para la pregunta número 1 presentada en la tabla anterior se puede observar que el 50 por ciento de los operarios considera que sus conocimientos actuales no son suficientes para realizar correctamente todas sus labores; esto se puede ver reflejado gráficamente en la figura 44.

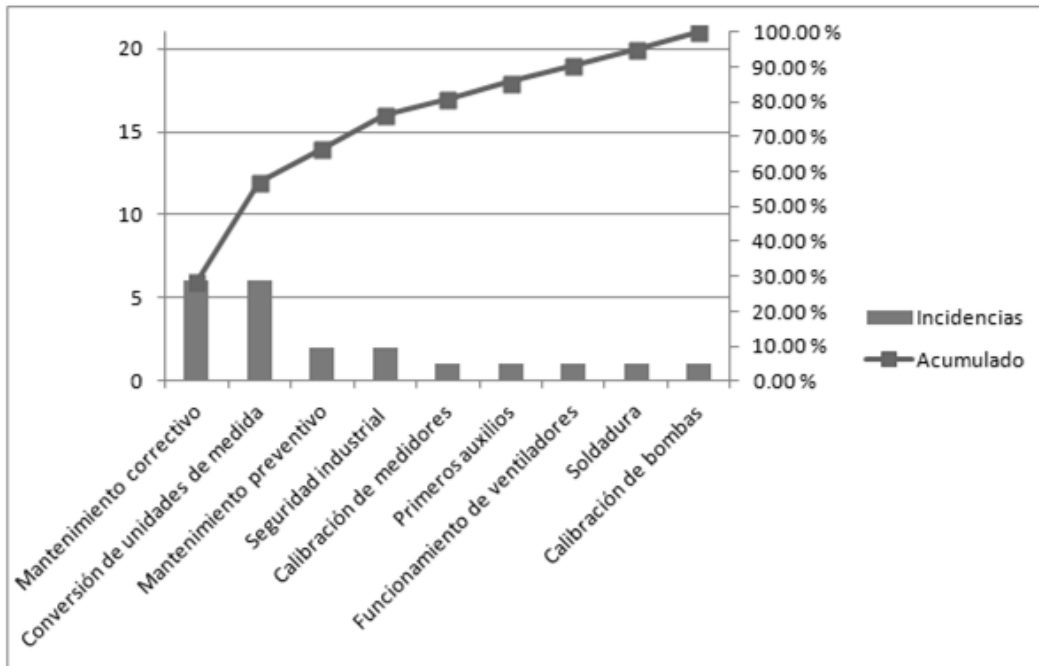
Figura 44. **Conocimientos actuales**



Fuente: elaboración propia.

Para poder observar de mejor manera los temas de capacitación, los cuales fueron obtenidos utilizando la pregunta 2 de la encuesta anterior, considerados de mayor relevancia por los operarios del sistema de aguas industriales se utiliza el diagrama de Pareto de la figura 45; en este se puede apreciar que el mantenimiento correctivo y la conversión de unidades de medida son las temáticas más reportadas en las cuales su frecuencia porcentual en ambos casos es de 28,57 por ciento.

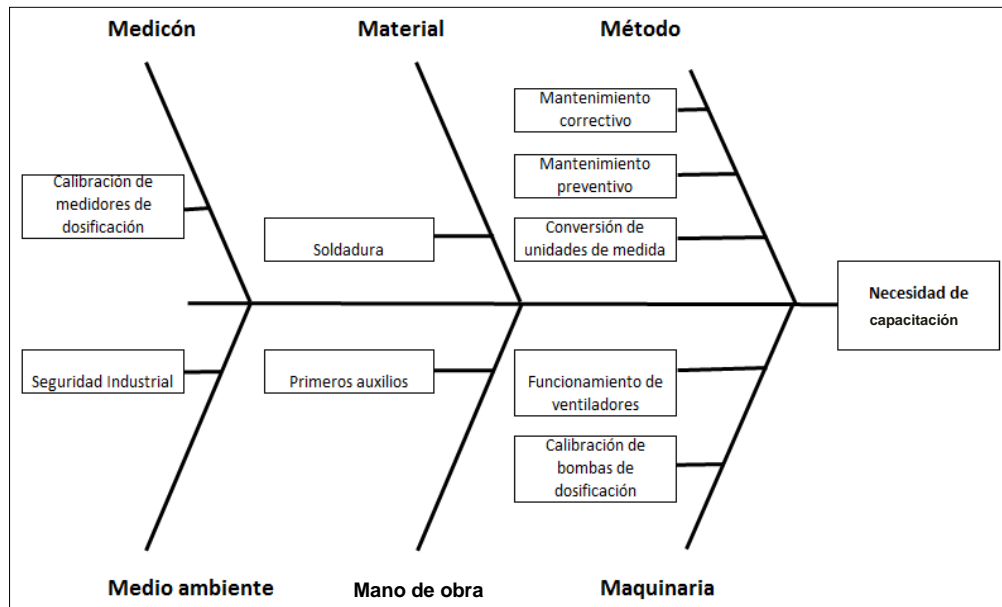
Figura 45. **Diagrama de Pareto, capacitación de sistema de aguas industriales de fábrica**



Fuente: elaboración propia.

La figura 46 muestra la recopilación y clasificación de los temas en los cuales al personal operativo del sistema de aguas industriales de fábrica consideran que deben ser capacitados, las cuales fueron obtenidas mediante la encuesta de la figura 43, observación y colaboración del personal que labora en la misma.

Figura 46. Diagrama Ishikawa, necesidad de capacitación



Fuente: elaboración propia.

Es necesario que dicho personal posea los lineamientos suficientes para identificar y actuar, de acuerdo con previo diagnóstico, en función de corregir las anomalías en el estado físico de la torre de enfriamiento, para garantizar una pronta solución de los problemas de estos equipos, así como poseer el conocimiento de conversión de unidades de medida para adaptarse a los cambiantes programas de dosificación. Con base en los diagramas anteriores, se observa que el personal necesita ser capacitado en relación con el mantenimiento correctivo de las torres de enfriamiento y la conversión de unidades de medida.

4.1.1. Planificación de capacitaciones

Se realizó la capacitación referente a diagnóstico, corrección y prevención de anomalías en el funcionamiento de torres de enfriamiento a los operarios del sistema de aguas industriales de fábrica; estas están enfocadas en que los problemas que puedan presentar estos equipos sean percibidos por el personal presente para ser resueltos a la brevedad. De igual manera se realizó la capacitación referente a conversión de unidades de medida, estando estas enfocadas en las conversiones de volumen, distancia, peso, flujo y temperatura, las cuales son las más utilizadas por los operarios de dicha área. Ver tabla LVIII.

Tabla LVIII. Planificación de capacitaciones

No.	Nombre de Actividad	Duración		Objetivo	Personal a capacitar	Cantidad de personas	Capacitador
		Días	Horas				
1	Diagnostico, corrección y prevención de anomalías en el funcionamiento de torres de enfriamiento	1	1	Torres de enfriamiento trabajando de forma óptima debido a la pronta identificación y corrección de anomalías en el funcionamiento y estado físico de dichos equipos	Operarios sistema de agua industriales de fabrica	6	Edwin Salas
2	Conversión de unidades de medida	1	1	Capacidad por parte del personal para adaptarse a las diferentes unidades de medida de dosificación de los programas de dosificación de químicos para el tratamiento del agua	Operarios sistema de agua industriales de fabrica	6	Edwin Salas

Fuente: elaboración propia.

4.1.2. Programas de capacitación

Las capacitaciones referentes al diagnóstico, corrección y prevención de anomalías en torre de enfriamiento son dadas de forma personalizada e individualmente a cada persona en el nivel cero de la torre de enfriamiento capacitando a un individuo por día, con duración de una hora, siendo el personal elegido para las mismas los 6 operarios de turno encargados de la operación del sistema de aguas industriales de fabrica.

La capacitación correspondiente a la conversión de unidades de medida se imparte en la sala de conferencias de las oficinas de Gerencia Industrial, teniendo una duración de una hora y se cita a los mismos 6 encargados de turno. La figura 47 presenta el cronograma de actividades.

Figura 47. **Cronograma de actividades, necesidad de capacitación**

Descripción de actividad				oct-14														
				Semana 1							Semana 2							
No.	Actividad	Lugar	Personal a capacitar	Tiempo(días)	M	J	V	S	D	L	M	M	J	V	S	D	L	M
					1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	Diagnostico, corrección y prevención de anomalías en torre de enfriamiento	Nivel cero de torre de enfriamiento de sistema de aguas industriales de fábrica	Operarios de sistema de aguas industriales de fábrica	8	■	■	■	■	■	■	■	■						
2	Conversión de unidades de medida	Sala de conferencias de oficinas de Gerencia Industrial	Operarios de sistema de aguas industriales de fábrica	1										■				

Fuente: elaboración propia, utilizando Microsoft Excel.

4.1.3. Evaluación de capacitaciones

La evaluación de las capacitaciones de diagnóstico, corrección y prevención de anomalías en torre de enfriamiento se realiza con cinco preguntas directas realizadas verbalmente, las cuales poseen un valor de 20 puntos cada una para un total de 100 puntos considerándose para la aprobación del mismo una nota mayor a 60 puntos; con esto se apreciará qué tanto del conocimiento se ha retenido y de esta forma fortalecer los aspectos que no se dominan del tema impartido mediante retroalimentación. La figura 48 muestra el listado de preguntas realizadas a los operarios.

Figura 48. **Listado de preguntas para comprobación de aprendizaje**

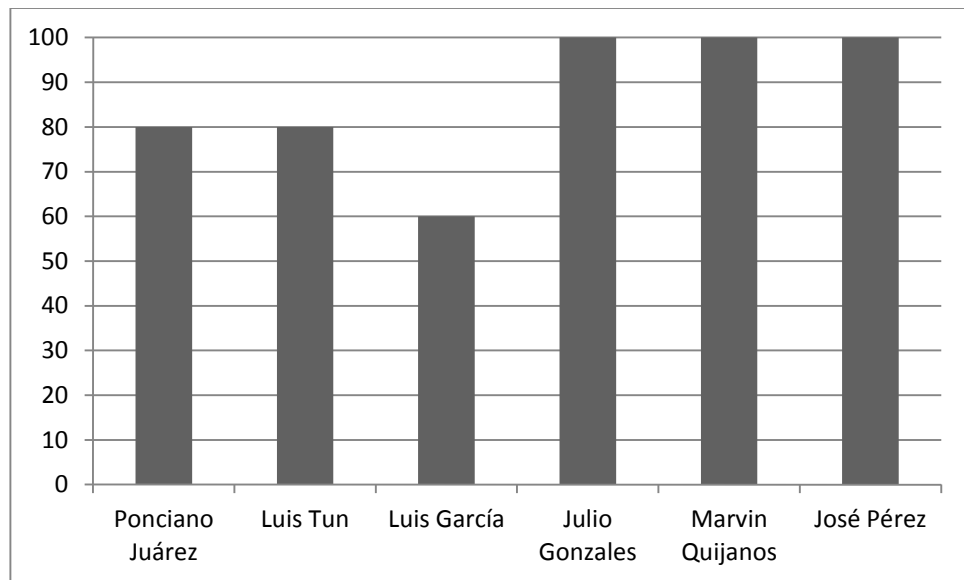
- Listado de preguntas**

 1. ¿Qué sucede si la distribución de agua no es uniforme en toda la torre de enfriamiento?
 2. ¿Qué indica cuando una gran cantidad de espuma sale por los cilindros del ventilador?
 3. ¿Cuáles son las medidas correctivas cuando hay secciones de relleno faltante?
 4. ¿Cómo prevenir que existan vibraciones no deseadas en los elementos mecánicos de la torre de enfriamiento?
 5. ¿Qué efectos tienen en la operación la falta de sección con eliminador de rocío?

Fuente: elaboración propia.

La figura 49 presenta el resultado obtenido por cada uno de los 6 operarios en la prueba de aprendizaje, se puede observar que todos han aprobado, pero se realiza un reforzamiento de los temas en que se ha fallado para garantizar que el tema se domine.

Figura 49. **Resultados de prueba, diagnóstico, corrección y prevención de anomalías en torre de enfriamiento**



Fuente: elaboración propia.

Para las capacitaciones de conversión de unidades de medida se realiza una comprobación de aprendizaje por medio de una prueba escrita al final de la capacitación; esta consiste en tres ejercicios matemáticos en los cuales los operarios deben realizar conversiones de una unidad de medida a otra referentes a distancia, caudal y temperatura. Las pruebas se clasifican sobre 100 puntos y se aprueba con un porcentaje igual o mayor a 60 por ciento; los ejercicios tienen un valor de 30, 30 y 40 puntos, respectivamente; la figura 50 muestra el formato de prueba suministrado.

La figura 51 presenta el resultado obtenido por cada uno de los 6 operarios en la prueba de aprendizaje, se puede observar que todos han aprobado, pero se realiza un reforzamiento de los ejercicios en que se ha fallado para garantizar que el tema se domine.

Figura 50. **Formato de prueba de comprobación de aprendizaje**

Comprobación de aprendizaje

Con base en el conocimiento adquirido resuelva los siguientes ejercicios.

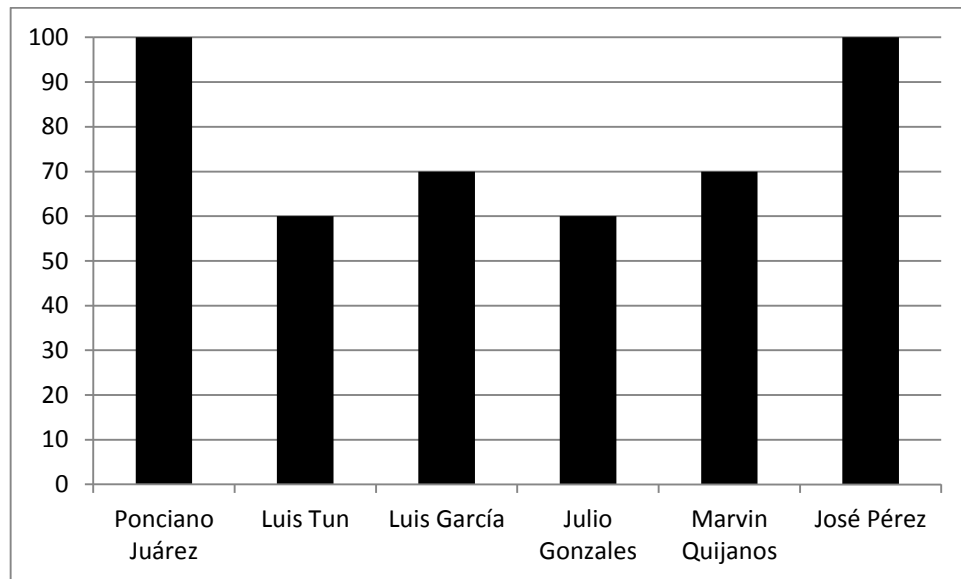
Ejercicio Núm. 1
Convertir 60 pies a centímetros.

Ejercicio Núm. 2
Convertir 2 metros cúbicos por segundo (m^3/seg) a galones por minuto (GPM).

Ejercicio Núm. 3
Convertir 80 grados Fahrenheit ($^{\circ}\text{F}$) a grados Celsius ($^{\circ}\text{C}$).

Fuente: elaboración propia.

Figura 51. **Resultados de prueba, conversión de unidades de medida**



Fuente: elaboración propia.

CONCLUSIONES

1. Las causas de variación de la operación de los sistemas de condensación que generan mayor consumo de agua para el área de recuperación de sacarosa es la falta de medidores de flujo para el agua de inyección al condensador, fugas por corrosión de tuberías y cuerpo del condensador por material inapropiado de construcción, enfriamiento excesivo de los condensados de salida del condensador, apertura excesiva de válvulas de inyección de agua, pérdida de vacío en bombas de vacío, poca la comunicación entre los operarios de tachos y sistema de aguas industriales de fábrica.
2. Se obtuvieron los parámetros de operación del sistema de condensación del área de recuperación de sacarosa con base en balanceos de masa y energía. Siendo los parámetros de temperatura de agua de entrada y salida de los condensadores de 32,22 y 51,11 grados Celsius, respectivamente, para lograr un vacío relativo entre 25 y 26,4 pulgadas de mercurio. El flujo másico total de bombeo de agua de inyección hacia los condensadores del los tachos del 1 al 16, calculado para cumplir con dichos parámetros, es de 3 122 165,30 kilogramos por hora.
3. El consumo de agua de relleno de la torre de enfriamiento utilizado durante el periodo de zafra calculado actualmente es de 7 813 322 463 galones y el consumo resultante calculado utilizando los parámetros propuestos es de 3 578 402 168 galones; esto representa una disminución en el consumo de agua de relleno de 4 234 920 295 galones.

4. Mediante el análisis termodinámico de la torre de enfriamiento nueva de capacidad de 24 000 galones por minuto se establecieron temperaturas de agua de operación de entrada y salida de la torre, respectivamente de 51,11 y 32,22 grados Celsius, con lo cual se obtiene una eficiencia térmica del 77,29 por ciento; este es mayor que el 72,99 por ciento de la eficiencia térmica de diseño proporcionada por el fabricante.
5. El costo por inversión inicial para la implementación del proyecto se estimo en Q 10 328 212,50, calculándose una disminución en los costos de operación de Q 5 308 550,95.
6. La medida de ahorro de agua en los sistemas sanitarios del área de fabricación consistente en volúmenes estacionarios colocados en los depósitos brinda un ahorro de agua por periodo de reparación de 6 962,22 galones.
7. Las capacitaciones referentes al diagnóstico y corrección de anomalías en el funcionamiento de las torres de enfriamiento, así como la forma de realizar conversiones de unidades de medida, se impartieron a los operarios de turno del sistema de aguas industriales de fábrica, teniendo una duración de una hora cada tema; las evaluaciones realizadas como verificación de la comprensión del tema por parte de dicho personal brindaron resultados satisfactorios.

RECOMENDACIONES

1. Para situaciones en las que el condensador barométrico no cuente con un buen sistema de separadores de arrastre se deberá tomar en cuenta los mismos como factores de corrosión y por ende como causantes de incremento de consumo de agua debido a perdidas por fugas en el equipo.
2. Para la futura persona que desee realizar análisis termodinámicos en condensadores barométricos de tachos, se deberá emplear el flujo másico de evaporación promedio del tacho dado que el condensador utiliza un flujo mayor de agua al inicio de una templa, debido al mayor flujo de vapor vegetal y disminuye el mismo al finalizarla.
3. Para obtener el valor del flujo de relleno o de sustitución de agua de una torre de enfriamiento es posible realizarlo rápidamente, si no se desea realizar un análisis termodinámico del sistema, considerando que este será aproximadamente un 2,5 por ciento del total del flujo de alimentación de la torre de enfriamiento; este valor puede dar una idea del flujo de agua que se pierde en la torre pero se recomienda si es posible, realizar el análisis termodinámico.
4. Si se capacita personal operativo en temas relacionados con cálculos numéricos; se recomienda brindar material de apoyo con ejemplos descritos paso a paso para garantizar la máxima comprensión del tema.

5. Al analizar termodinámicamente una torre de enfriamiento en caso de que no conozca los valores de temperatura de bulbo húmedo del lugar es posible, si es que no se cuenta con un psicrómetro electrónico, obtenerla utilizando un termómetro de bulbo ordinario, colocando un paño o gaza majada en el bulbo del termómetro y hacerlo girar sujetándolo del otro extremo, esto hará que el termómetro indique una nueva temperatura, la cual será la temperatura de bulbo húmedo; repetir esto en diferentes horas del día y durante el periodo de estudio del lugar, utilizar la temperatura promedio mayor.
6. Para disminuir los costos de operación en sistemas que utilizan motores eléctricos se recomienda el uso de variadores de frecuencia para poder utilizar solo la potencia necesaria que se requiera, con lo que se reducirá el consumo eléctrico.
7. Para medidas de ahorro de agua que utilicen volúmenes estacionarios o muertos en los depósitos de los sanitarios se puede incrementar el ahorro de agua, colocando la mayor cantidad de estos, verificando que no obstruyan los mecanismos de descarga y que proporcionen un flujo de agua suficiente para realizar la descarga eficientemente.

BIBLIOGRAFÍA

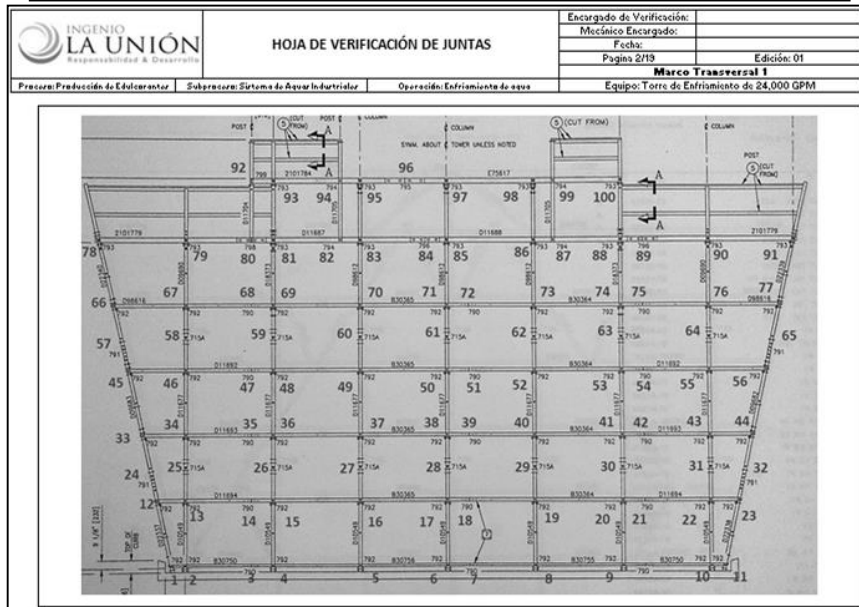
1. BLANK, Leland; TARQUIN, Anthony. *Ingeniería económica*. 4a ed. Santafé de Bogotá: McGraw-Hill, 1999. 740 p. ISBN: 958-600-966-1.
2. BOLES, Michales; CENGEL, Yunes. *Termodinámica*. 7a ed. México: McGraw-Hill Interamericana Editores S. A., 2012. 1041 p. ISBN: 978-607-15-0743-3.
3. BRANAN, Carl. *Soluciones prácticas para el Ingeniero Químico*. 2a ed. México: McGraw-Hill Interamericana Editores S. A., 2008. 408 p. ISBN: 970-10-2733-7.
4. CALDERÓN, Jorge Armando. *Importancia de la determinación de del costo de capital de una empresa constructora de vivienda que no cotiza en la bolsa de valores*. Dirección: Günter Estacuy Tamayac. Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ciencias Económicas. 2005. 86 p.
5. CAMAGRO. *Reporte del sector agro y sus perspectivas*. [en línea]. <<http://camaradelagro.org/wp-content/uploads/2014/01/Reporte-Agro-y-Perspectivas-2012.pdf>>. [Consulta: noviembre de 2014].
6. CENGEL, Yunus; CIMBALA, John. *Mecánica de fluidos: fundamentos y aplicaciones*. Madrid: McGraw-Hill Interamericana de España S. L., 2006. 956 p. ISBN: 970-10-5612-4.

7. CORONADO, Carlos Humberto. *Diseño de un sistema de aire acondicionado para la 29ª compañía de Bomberos Voluntarios, con base en un chiller enfriado por aire*. Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Mecánica, 2014. 221 p.
8. HERNÁNDEZ, Eduardo. *Fundamentos de aire acondicionado y refrigeración*. México: Limusa, 2009. 465 p. ISBN: 13-978-968-18-0604-0.
9. MOTT, Robert. *Mecánica de fluidos*. 6a ed. México: Pearson Educación, 2006. 644 p. ISBN: 970-26-0805-8.
10. REIN, Peter. *Ingeniería de la caña de azúcar*. Berlín: Editorial Bartens, 2012. 883 p. ISBN 38-700-4014-27.
11. RÍOS, Jorge Luis. *Valoración de una empresa comercial por medio del método de flujos de caja libres descontados*. Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ciencias Económicas, 2009. 76 p.
12. RUFES, Pedro. *Condensadores*. Madrid: Grupo Editorial CEAC, 2000. 161 p. ISBN: 84-390-6564-2.
13. Siemens. *Medidores de caudal electromagnéticos*. [en línea]. <http://www.soltechltda.com/index.php?option=com_k2&view=item&layout=item&id=94&Itemid=82&lang=es>. [Consulta: noviembre de 2014].


APÉNDICES

Apéndice 1. Hoja de verificación de juntas de torre de enfriamiento

INGENIO LA UNIÓN Responsabilidad & Desarrollo		HOJA DE VERIFICACIÓN DE JUNTAS			Encargado de Verificación:				
					Mecánico Encargado:				
					Fecha:				
					Código:				
					Página 113				
					Edición: 01				
Proceso: Producción de Edificatorio		Subproceso: Sistema de Agua Industrial			Operación: Enfriamiento de agua				
					Equipo: Torre de Enfriamiento de 24,000 GPM				
MARCO TRANSVERSAL 1									
1 T92	2 T92	3 T90	4 T92	5 T92	6 T92	7 T90	8 T92	9 T92	10 T92
11 T92	12 T92	13 T92	14 T90	15 T92	16 T92	17 T92	18 T90	19 T92	20 T92
21 T90	22 T92	23 T92	24 T91	25 T95A	26 T95A	27 T95A	28 T95A	29 T95A	30 T95A
31 T95A	32 T91	33 T92	34 T92	35 T90	36 T92	37 T92	38 T92	39 T90	40 T92
41 T92	42 T90	43 T92	44 T92	45 T92	46 T92	47 T90	48 T92	49 T92	50 T92
51 T90	52 T92	53 T92	54 T90	55 T92	56 T92	57 T91	58 T95A	59 T95A	60 T95A
61 T95A	62 T95A	63 T95A	64 T95A	65 T91	66 T92	67 T92	68 T90	69 T92	70 T92
71 T92	72 T90	73 T92	74 T92	75 T90	76 T92	77 T92	78 T93	79 T93	80 T93
81 T93	82 T94	83 T93	84 T96	85 T93	86 T93	87 T94	88 T93	89 T96	90 T93
91 T93	92 T93	93 T93	94 T94	95 T93	96 T95	97 T93	98 T93	99 T94	100 T93
Observaciones:								Color	Descripción
									Numero de junta
									Numero de detalle de junta



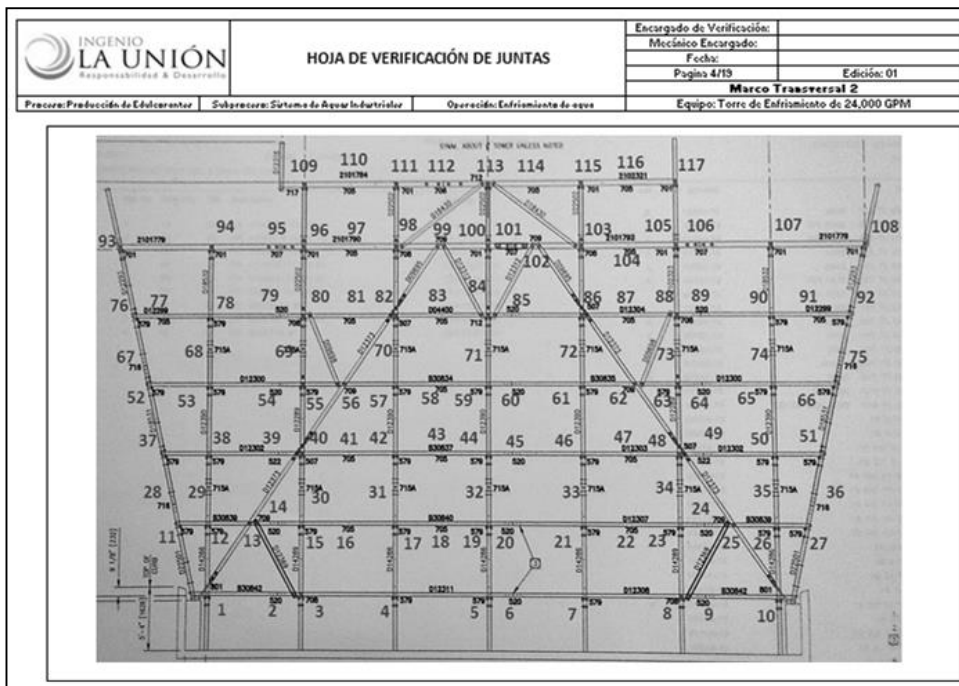
Continuación de apéndice 1.

	HOJA DE VERIFICACIÓN DE JUNTAS		Encargado de Verificación:		
			Mecánico Encargado:		
			Fecha:		
			Celds: No.1 No.2 No.3		
		Marco: 2.1 2.2 2.3 2.4			
		Página 3/13 Edición: 01			
Proceso: Producción de Edulcorante	Subproceso: Sistema de Agua Industrial	Operación: Enfriamiento de agua	Equipo: Torre de Enfriamiento de 24,000 GPM		


MARCO TRANSVERSAL 2																											
1	601	2	520	3	708	4	579	5	579	6	520	7	579	8	708	9	520	10	801	11	579	12	579	13	709	14	520
15	579	16	705	17	579	18	705	19	579	20	520	21	579	22	705	23	579	24	520	25	709	26	579	27	579	28	716
29	715A	30	715A	31	715A	32	715A	33	715A	34	715A	35	715A	36	716	37	579	38	579	39	522	40	507	41	705	42	579
43	705	44	579	45	520	46	579	47	705	48	507	49	522	50	579	51	579	52	579	53	579	54	520	55	579	56	709
57	579	58	705	59	579	60	520	61	579	62	709	63	579	64	520	65	579	66	579	67	716	68	715A	69	715A	70	715A
71	715A	72	715A	73	715A	74	715A	75	716	76	579	77	705	78	579	79	520	80	708	81	705	82	507	83	705	84	712
85	520	86	507	87	705	88	708	89	520	90	579	91	705	92	579	93	701	94	701	95	707	96	701	97	705	98	708
99	709	100	701	101	701	102	709	103	708	104	705	105	701	106	701	107	701	108	701	109	717	110	705	111	701	112	706
113	712	114	705	115	701	116	705	117	701																		

Observaciones: _____

Color	Descripción
	Número de junta
	Número de detalle de junta



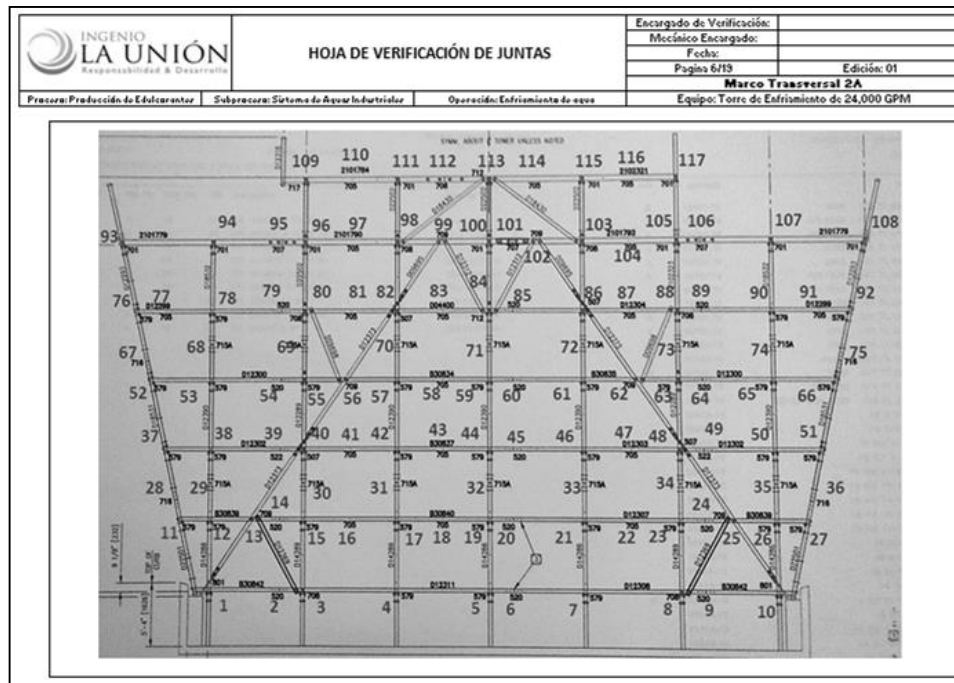
Continuación de apéndice 1.

	HOJA DE VERIFICACIÓN DE JUNTAS		Encargado de Verificación:			
			Mecánico Encargado:			
			Fecha:			
			Celda:	No.1	No.2	No.3
			Marco:	2A.1		2A.2
Página 5/13			Edición: 01			
Procesos: Producción de Edulcorante	Subproceso: Sistema de Agua Industrial	Operación: Enfriamiento de agua	Equipo: Torre de Enfriamiento de 24,000 GPM			


MARCO TRANSVERSAL 2A																											
1	801	2	520	3	708	4	579	5	579	6	520	7	579	8	708	9	520	10	801	11	579	12	579	13	709	14	520
15	579	16	705	17	579	18	705	19	579	20	520	21	579	22	705	23	579	24	520	25	709	26	579	27	579	28	716
29	715A	30	715A	31	715A	32	715A	33	715A	34	715A	35	715A	36	716	37	579	38	579	39	522	40	507	41	705	42	579
43	705	44	579	45	520	46	579	47	705	48	507	49	522	50	579	51	579	52	579	53	579	54	520	55	579	56	709
57	579	58	705	59	579	60	520	61	579	62	708	63	579	64	520	65	579	66	579	67	716	68	715A	69	715A	70	715A
71	715A	72	715A	73	715A	74	715A	75	716	76	579	77	705	78	579	79	520	80	708	81	705	82	507	83	705	84	712
85	520	86	507	87	705	88	708	89	520	90	579	91	705	92	579	93	701	94	701	95	707	96	701	97	705	98	708
99	709	100	701	101	707	102	709	103	708	104	705	105	701	106	707	107	701	108	701	109	717	110	705	111	701	112	706
113	712	114	705	115	701	116	705	117	701																		

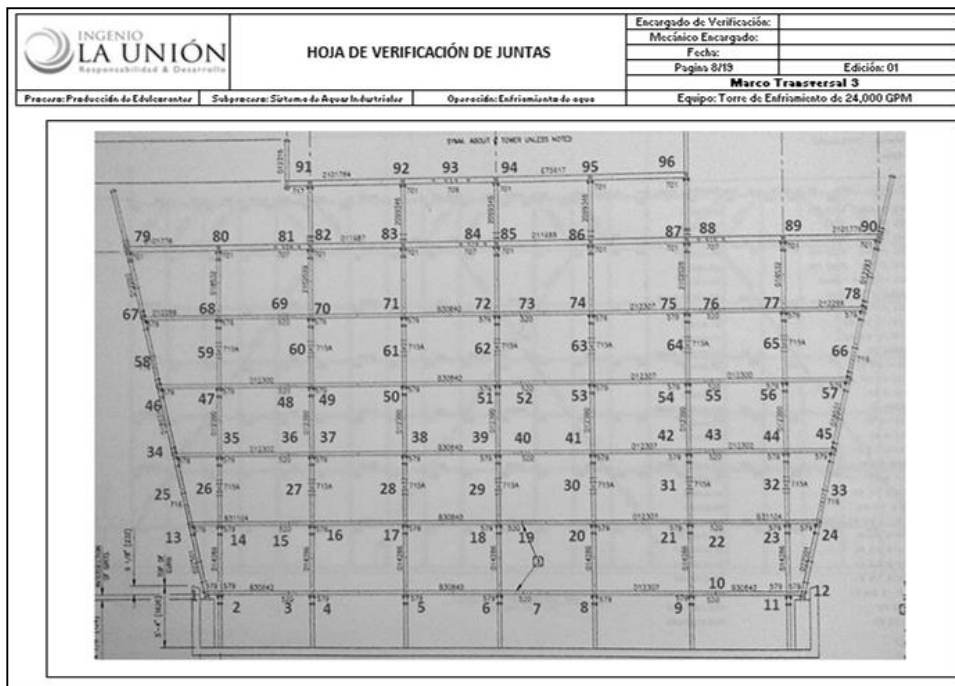
Observaciones: _____

Color	Descripción
	Numero de junta
	Numero de detalle de junta





Continuación de apéndice 1.

	HOJA DE VERIFICACIÓN DE JUNTAS			Encargado de Verificación:									
				Mecánico Encargado:									
				Fecha:									
				Código: No.1 No.2 No.3									
Proceso: Producción de Edulcorante		Subproceso: Sistema de Agua Industrial		Operación: Enfriamiento de agua		Edición: 01							
						Equipo: Torre de Enfriamiento de 24,000 GPM							
MARCO TRANSVERSAL 3													
1 579	2 579	3 520	4 579	5 579	6 579	7 520	8 579	9 579	10 520				
11 579	12 579	13 579	14 579	15 520	16 579	17 579	18 579	19 520	20 579				
21 579	22 520	23 579	24 579	25 716	26 715A	27 715A	28 715A	29 715A	30 715A				
31 715A	32 715A	33 716	34 579	35 579	36 520	37 579	38 579	39 579	40 520				
41 579	42 579	43 520	44 579	45 579	46 579	47 579	48 520	49 579	50 579				
51 579	52 520	53 579	54 579	55 520	56 579	57 579	58 716	59 715A	60 715A				
61 715A	62 715A	63 715A	64 715A	65 715A	66 716	67 579	68 579	69 520	70 579				
71 579	72 579	73 520	74 579	75 579	76 520	77 579	78 579	79 701	80 701				
81 701	82 701	83 701	84 701	85 701	86 701	87 701	88 701	89 701	90 701				
91 717	92 701	93 706	94 701	95 701	96 701								
Observaciones: _____						<table border="1" style="font-size: small;"> <tr> <th>Color</th> <th>Descripción</th> </tr> <tr> <td style="background-color: #cccccc;"></td> <td>Numero de junta</td> </tr> <tr> <td style="background-color: #cccccc;"></td> <td>Numero de detalle de junta</td> </tr> </table>		Color	Descripción		Numero de junta		Numero de detalle de junta
Color	Descripción												
	Numero de junta												
	Numero de detalle de junta												




Continuación de apéndice 1.

		HOJA DE VERIFICACIÓN DE JUNTAS			Encargado de Verificación:																						
					Mecánico Encargado:																						
Precora: Producción de Edulcorante Subprecora: Sistema de Agua Industrial Operación: Enfriamiento de agua		Equipo: Torre de Enfriamiento de 24,000 GPM		Fecha:																							
				Página 3/13 Edición: 01																							
				Marco Longitudinal 1																							
MARCO LONGITUDINAL 1																											
1	811	2	579	3	579	4	579	5	579	6	520	7	579	8	579	9	867	10	579	11	520	12	579	13	579	14	579
15	579	16	520	17	579	18	867	19	579	20	579	21	520	22	579	23	579	24	579	25	579	26	811	27	701	28	555
29	579	30	579	31	579	32	520	33	579	34	579	35	579	36	555	37	522	38	579	39	579	40	579	41	579	42	522
43	555	44	579	45	579	46	579	47	520	48	579	49	579	50	579	51	555	52	701	53	701	54	579	55	555	56	579
57	579	58	520	59	579	60	579	61	579	62	579	63	522	64	555	65	579	66	579	67	555	68	522	69	579	70	579
71	579	72	579	73	520	74	579	75	579	76	555	77	579	78	701	79	701	80	579	81	579	82	555	83	579	84	520
85	579	86	579	87	579	88	579	89	520	90	579	91	555	92	762	93	555	94	579	95	520	96	579	97	579	98	579
99	579	100	520	101	579	102	555	103	579	104	579	105	701	106	701	107	579	108	579	109	579	110	555	111	522	112	579
113	579	114	579	115	579	116	520	117	579	118	555	119	555	120	579	121	520	122	579	123	579	124	579	125	579	126	522
127	555	128	579	129	579	130	579	131	701	132	708	133	701	134	701	135	701	136	701	137	724	138	525	139	701	140	701
141	701	142	724	143	525	144	701	145	701	146	525	147	724	148	701	149	701	150	701	151	525	152	724	153	701	154	701
155	701	156	701	157	708	158	572	159	572	160	572	161	572	162	572	163	572	164	572	165	572	166	572	167	572	168	572
169	572	170	701	171	708	172	702	173	701	174	702	175	701	176	701	177	702	178	510	179	701	180	702	181	701	182	701
183	701	184	510	185	702	186	701	187	702	188	701	189	701	190	702	191	701	192	702	193	510	194	701	195	701	196	701
197	702	198	510	199	701	200	702	201	701	202	701	203	702	204	701	205	702	206	708	207	701						
Observaciones:							<table border="1"> <thead> <tr> <th>Color</th> <th>Descripción</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td></td> <td>Numero de junta</td> </tr> <tr> <td></td> <td>Numero de detalle de junta</td> </tr> </tbody> </table>		Color	Descripción		Numero de junta		Numero de detalle de junta													
Color	Descripción																										
	Numero de junta																										
	Numero de detalle de junta																										


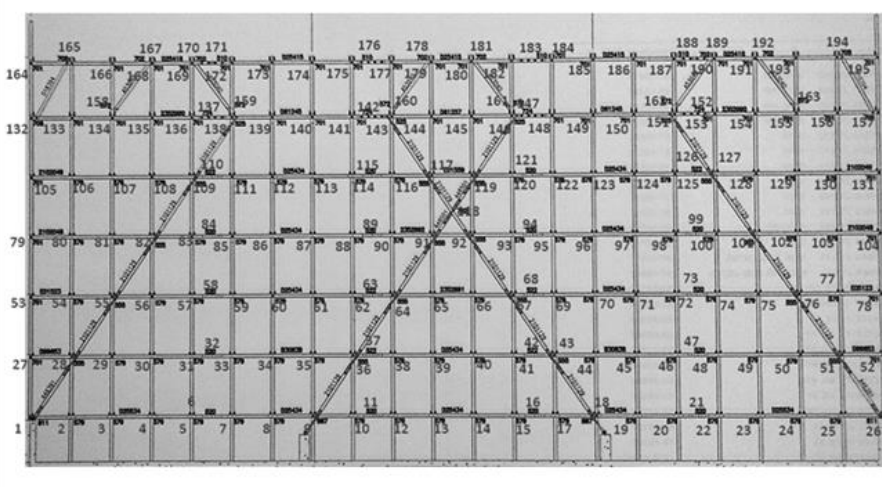
		HOJA DE VERIFICACIÓN DE JUNTAS			Encargado de Verificación:														
					Mecánico Encargado:														
Precora: Producción de Edulcorante Subprecora: Sistema de Agua Industrial Operación: Enfriamiento de agua		Equipo: Torre de Enfriamiento de 24,000 GPM		Fecha:															
				Página 10/13 Edición: 01															
				Marco Longitudinal 1															
MARCO LONGITUDINAL 1																			
170	171	172	174	177	178	180	184	185	187	190	192	193	197	198	200	203	205	206	
158	159	173	175	176	179	181	182	183	186	188	189	191	194	195	196	199	201	202	204
132	133	134	135	136	138	139	140	141	143	144	145	146	148	149	150	151	153	156	157
106	107	108	109	110	112	113	114	115	117	118	119	120	122	123	124	125	128	129	130
79	80	81	82	83	85	86	87	88	90	91	93	94	96	97	98	99	101	102	103
53	54	55	56	57	59	60	61	62	64	65	66	67	69	70	71	72	74	75	76
27	28	29	30	31	33	34	35	36	38	39	40	41	44	45	46	48	49	50	51
6																			
1	2	3	4	5	7	8	9	10	12	13	14	15	17	18	20	22	23	24	25

Continuación de apéndice 1.


	HOJA DE VERIFICACIÓN DE JUNTAS		Encargado de Verificación:																								
			Mecánico Encargado:																								
			Fecha:																								
			Marco	2.1 2.2																							
			Página 11/13	Edición: 01																							
Proceso: Producción de Edificantes		Subproceso: Sistema de Agua Industrial		Operación: Enfriamiento de agua																							
Equipo: Torre de Enfriamiento de 24,000 GPM																											
MARCO LONGITUDINAL 2																											
1	811	2	579	3	579	4	579	5	579	6	520	7	579	8	579	9	867	10	579	11	520	12	579	13	579	14	579
15	579	16	520	17	579	18	867	19	579	20	579	21	520	22	579	23	579	24	579	25	579	26	811	27	701	28	555
29	579	30	579	31	579	32	520	33	579	34	579	35	579	36	555	37	522	38	579	39	579	40	579	41	579	42	522
43	555	44	579	45	579	46	579	47	520	48	579	49	579	50	579	51	555	52	701	53	701	54	579	55	555	56	579
57	579	58	520	59	579	60	579	61	579	62	579	63	522	64	555	65	579	66	579	67	555	68	522	69	579	70	579
71	579	72	579	73	520	74	579	75	579	76	555	77	579	78	701	79	701	80	579	81	579	82	555	83	579	84	520
85	579	86	579	87	579	88	579	89	520	90	579	91	555	92	555	93	579	94	520	95	579	96	579	97	579	98	579
99	520	100	579	101	555	102	579	103	579	104	701	105	701	106	579	107	579	108	579	109	555	110	522	111	579	112	579
113	579	114	579	115	520	116	579	117	555	118	762	119	555	120	579	121	520	122	579	123	579	124	579	125	579	126	522
127	555	128	579	129	579	130	579	131	701	132	708	133	701	134	701	135	701	136	701	137	724	138	525	139	701	140	701
141	701	142	724	143	525	144	701	145	701	146	525	147	724	148	701	149	701	150	701	151	525	152	724	153	701	154	701
155	701	156	701	157	708	158	572	159	572	160	572	161	572	162	572	163	572	164	701	165	708	166	701	167	702	168	701
169	701	170	702	171	510	172	701	173	701	174	701	175	701	176	510	177	701	178	702	179	701	180	701	181	702	182	701
183	510	184	701	185	701	186	701	187	701	188	510	189	702	190	701	191	701	192	702	193	701	194	708	195	701		

Observaciones: _____

Color	Descripción
	Numero de junta
	Numero de detalle de junta

	HOJA DE VERIFICACIÓN DE JUNTAS		Encargado de Verificación:		
			Mecánico Encargado:		
			Fecha:		
			Marco	2.1 2.2	
			Página 12/13	Edición: 01	
Proceso: Producción de Edificantes		Subproceso: Sistema de Agua Industrial		Operación: Enfriamiento de agua	
Equipo: Torre de Enfriamiento de 24,000 GPM					
MARCO LONGITUDINAL 2					
					


Continuación de apéndice 1.

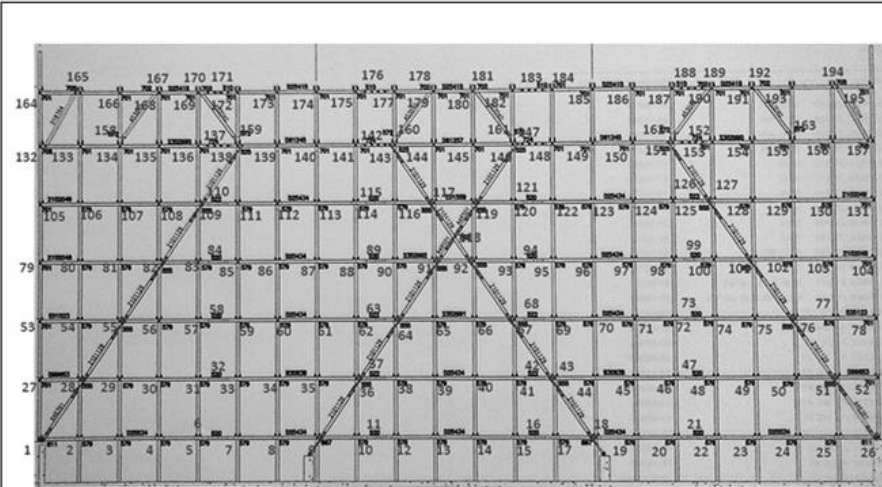
 <p>INGENIO LA UNIÓN Responsabilidad & Desarrollo</p>	HOJA DE VERIFICACIÓN DE JUNTAS			Encargado de Verificación:	
				Mecánico Encargado:	
				Fecha:	
				Marco:	3.1 3.2
				Página 13/13	Edición: 01
Proceso: Producción de Edulcorantes		Subproceso: Sistema de Agua Industrial		Operación: Enfriamiento de agua	
			Equipo: Torre de Enfriamiento de 24,000 GPM		

MARCO LONGITUDINAL 3																											
1	811	2	573	3	573	4	573	5	573	6	520	7	573	8	573	9	867	10	573	11	520	12	573	13	573	14	573
15	573	16	520	17	573	18	867	19	573	20	573	21	520	22	573	23	573	24	573	25	573	26	811	27	701	28	555
29	573	30	573	31	573	32	520	33	573	34	573	35	573	36	555	37	522	38	573	39	573	40	573	41	573	42	522
43	555	44	573	45	573	46	573	47	520	48	573	49	573	50	573	51	555	52	701	53	701	54	573	55	555	56	573
57	573	58	520	59	573	60	573	61	573	62	573	63	522	64	555	65	573	66	573	67	555	68	522	69	573	70	573
71	573	72	573	73	520	74	573	75	573	76	555	77	573	78	701	79	701	80	573	81	573	82	555	83	573	84	520
85	573	86	573	87	573	88	573	89	520	90	573	91	555	92	555	93	573	94	520	95	573	96	573	97	573	98	573
99	520	100	573	101	555	102	573	103	573	104	701	105	701	106	573	107	573	108	573	109	555	110	522	111	573	112	573
113	573	114	573	115	520	116	573	117	555	118	762	119	555	120	573	121	520	122	573	123	573	124	573	125	573	126	522
127	555	128	573	129	573	130	573	131	701	132	701	133	701	134	701	135	701	136	701	137	724	138	525	139	701	140	701
141	701	142	724	143	525	144	701	145	701	146	525	147	724	148	701	149	701	150	701	151	525	152	724	153	701	154	701
155	701	156	701	157	701	158	572	159	572	160	572	161	572	162	572	163	572	164	701	165	701	166	701	167	702	168	701
169	701	170	702	171	570	172	701	173	701	174	701	175	701	176	570	177	701	178	702	179	701	180	701	181	702	182	701
183	570	184	701	185	701	186	701	187	701	188	570	189	702	190	701	191	701	192	702	193	701	194	701	195	701		


Observaciones: _____

Color	Descripción
	Numero de junta
	Numero de detalle de junta

 <p>INGENIO LA UNIÓN Responsabilidad & Desarrollo</p>	HOJA DE VERIFICACIÓN DE JUNTAS			Encargado de Verificación:	
				Mecánico Encargado:	
				Fecha:	
				Página 14/13	
				Edición: 01	
Proceso: Producción de Edulcorantes		Subproceso: Sistema de Agua Industrial		Operación: Enfriamiento de agua	
			Marco Longitudinal 3		
			Equipo: Torre de Enfriamiento de 24,000 GPM		




Continuación de apéndice 1.

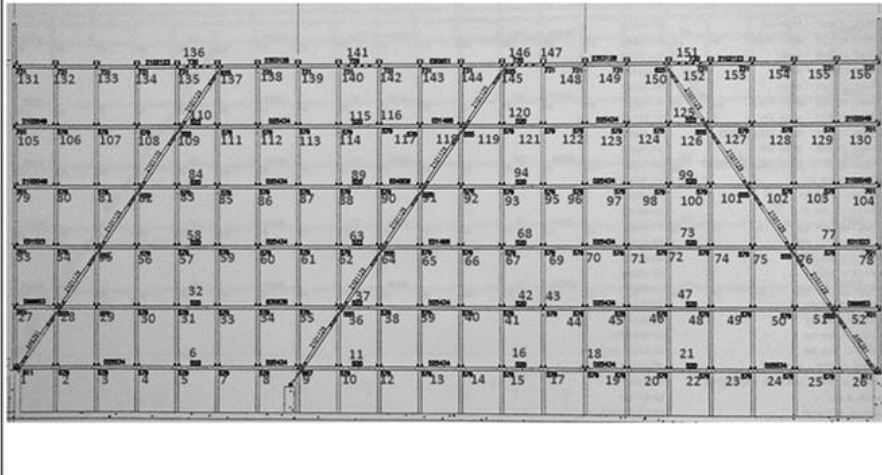
	HOJA DE VERIFICACIÓN DE JUNTAS		Encargado de Verificación:		
			Mecánico Encargado:		
			Fecha:		
			Marco:	4.1	4.2
Página 15/19		Edición: 01			
Proceso: Producción de Edulcorante		Subproceso: Sistema de Agua Industrial		Operación: Enfriamiento de agua	
				Equipo: Torre de Enfriamiento de 24,000 GPM	

MARCO LONGITUDINAL 4																											
1	811	2	579	3	579	4	579	5	579	6	520	7	579	8	579	9	867	10	579	11	520	12	579	13	579	14	579
15	579	16	520	17	579	18	579	19	579	20	579	21	520	22	579	23	579	24	579	25	579	26	811	27	701	28	555
29	579	30	579	31	579	32	520	33	579	34	579	35	579	36	555	37	522	38	579	39	579	40	579	41	579	42	522
43	579	44	579	45	579	46	579	47	520	48	579	49	579	50	579	51	555	52	701	53	701	54	579	55	555	56	579
57	579	58	520	59	579	60	579	61	579	62	579	63	522	64	555	65	579	66	579	67	579	68	522	69	579	70	579
71	579	72	579	73	520	74	579	75	579	76	555	77	579	78	701	79	701	80	579	81	579	82	555	83	579	84	520
85	579	86	579	87	579	88	579	89	520	90	579	91	555	92	579	93	579	94	520	95	579	96	579	97	579	98	579
99	520	100	579	101	555	102	579	103	579	104	701	105	701	106	579	107	579	108	579	109	555	110	522	111	579	112	579
113	579	114	579	115	520	116	579	117	579	118	555	119	579	120	520	121	579	122	579	123	579	124	579	125	522	126	555
127	579	128	579	129	579	130	701	131	731	132	731	133	731	134	731	135	731	136	730	137	825	138	731	139	731	140	731
141	729	142	731	143	731	144	731	145	825	146	730	147	731	148	731	149	731	150	825	151	730	152	731	153	731	154	731
155	731	156	731																								


Observaciones: _____

Color	Descripción
	Numero de junta
	Numero de detalle de junta

	HOJA DE VERIFICACIÓN DE JUNTAS		Encargado de Verificación:		
			Mecánico Encargado:		
			Fecha:		
			Marco:	Edición: 01	
Página 16/19		Marco Longitudinal 4			
Proceso: Producción de Edulcorante		Subproceso: Sistema de Agua Industrial		Operación: Enfriamiento de agua	
				Equipo: Torre de Enfriamiento de 24,000 GPM	




Continuación de apéndice 1.

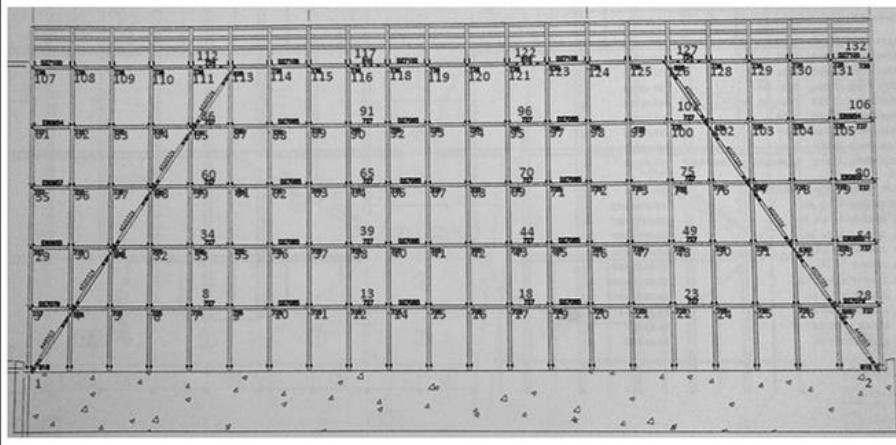
 INGENIO LA UNIÓN <small>Responsabilidad & Desarrollo</small>	HOJA DE VERIFICACIÓN DE JUNTAS		Encargado de Verificación:	
			Mecánico Encargado:	
			Fecha:	
			Marco	4A.1
		Página 11/19		Edición: 01
Proceso: Producción de Edulcorante		Subproceso: Sistema de Agua Industrial		Operación: Enfriamiento de agua
				Equipo: Torre de Enfriamiento de 24,000 GPM

MARCO LONGITUDINAL 4A																											
1	818	2	818	3	T37	4	585	5	T35	6	T35	7	T35	8	T27	9	T35	10	T35	11	T35	12	T35	13	T27	14	T35
15	T35	16	T35	17	T35	18	T27	19	T35	20	T35	21	T35	22	T35	23	T27	24	T35	25	T35	26	T35	27	585	28	T37
29	T37	30	T35	31	530	32	T35	33	T35	34	T27	35	T35	36	T35	37	T35	38	T35	39	T27	40	T35	41	T35	42	T35
43	T35	44	T27	45	T35	46	T35	47	T35	48	T35	49	T27	50	T35	51	T35	52	530	53	T35	54	T37	55	T37	56	T35
57	T35	58	530	59	T35	60	T27	61	T35	62	T35	63	T35	64	T35	65	T27	66	T35	67	T35	68	T35	69	T35	70	T27
71	T35	72	T35	73	T35	74	T35	75	T27	76	T35	77	530	78	T35	79	T35	80	T37	81	T37	82	T35	83	T35	84	T35
85	530	86	T27	87	T35	88	T35	89	T35	90	T35	91	T27	92	T35	93	T35	94	T35	95	T35	96	T27	97	T35	98	T35
99	T35	100	T35	101	T27	102	530	103	T35	104	T35	105	T35	106	T37	107	T36	108	T36	109	T36	110	T36	111	T36	112	T24
113	828	114	T36	115	T36	116	T36	117	510	118	T36	119	T36	120	T36	121	T36	122	510	123	T36	124	T36	125	T36	126	828
127	T24	128	T36	129	T36	130	T36	131	T36	132	T36																

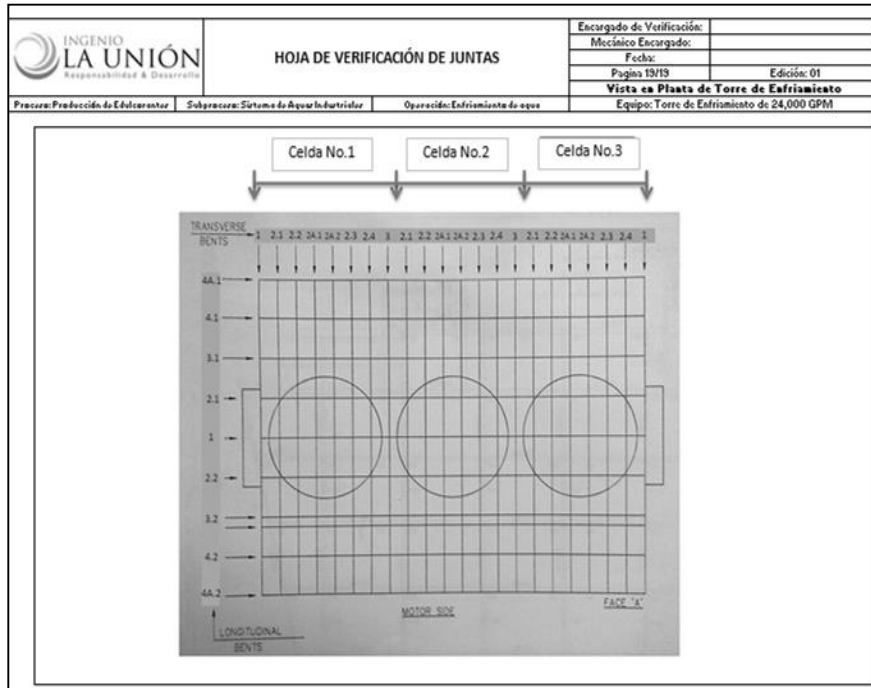
Observaciones: _____

Color	Descripción
	Numero de junta
	Numero de detalle de junta

 INGENIO LA UNIÓN <small>Responsabilidad & Desarrollo</small>	HOJA DE VERIFICACIÓN DE JUNTAS		Encargado de Verificación:	
			Mecánico Encargado:	
			Fecha:	
			Página 18/19	
		Edición: 01		Marco Longitudinal 4A
Proceso: Producción de Edulcorante		Subproceso: Sistema de Agua Industrial		Operación: Enfriamiento de agua
				Equipo: Torre de Enfriamiento de 24,000 GPM



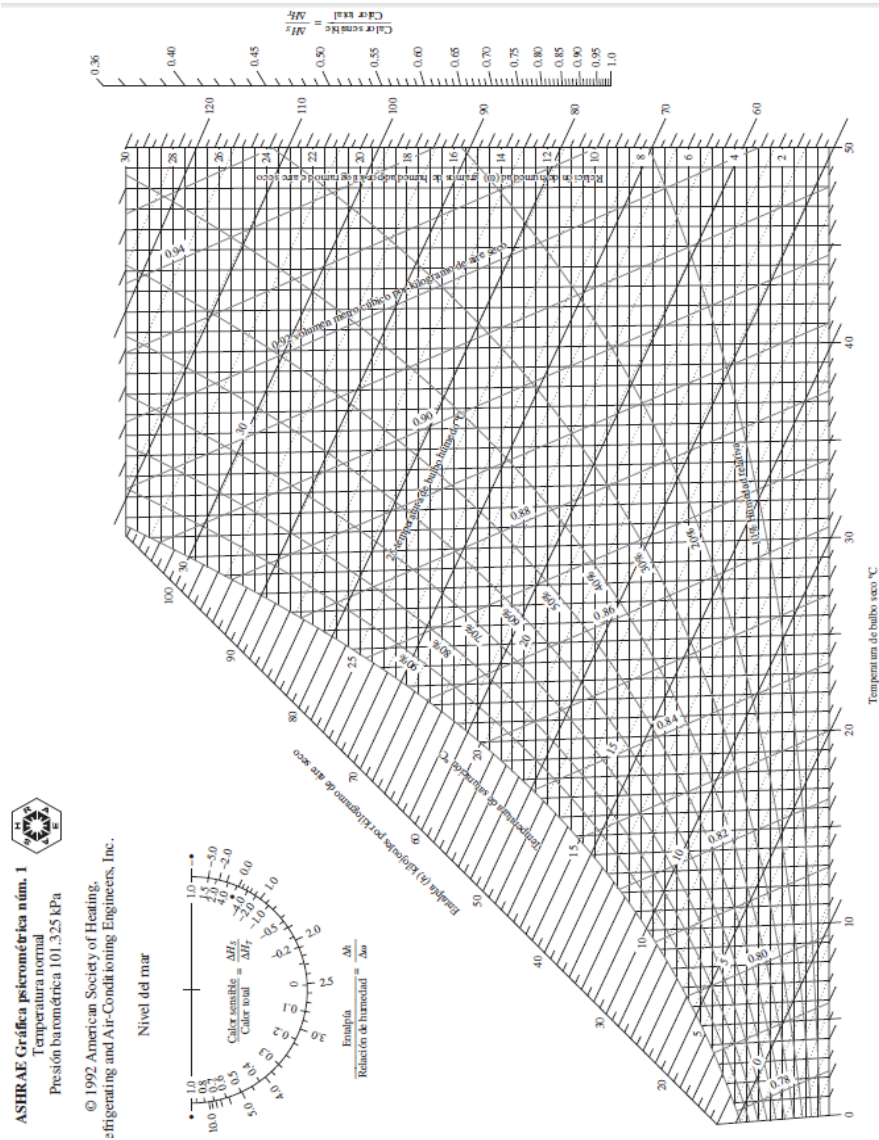
Continuación de apéndice 1.



Fuente: elaboración propia, utilizando Microsoft Excel.

ANEXOS

Anexos 1. Carta psicrométrica a una atmósfera



Fuente: BOLES, Michales; CENGEL, Yunes. *Termodinámica*. p. 914.

Anexo 2. **Equivalencia entre diferentes unidades de presión**

Temperatura de saturación del vapor en °C	Presión absoluta en kPa	Vacío relativo a STP en °Hg	Vacío relativo a STP en mm Hg	Presión absoluta en mbar
100.0	101.3	0	0	1013
75.9	40.0	18.1	460	400
69.1	30.0	21.1	536	300
60.1	20.0	24.0	610	200
56.2	16.66	25.0	635	167
54.0	15.0	25.5	648	150
52.6	14.0	25.8	655	140
51.5	13.27	26.0	660	133
49.4	12.0	26.4	671	120
48.7	11.58	26.5	673	116
45.6	9.89	27.0	686	99
41.5	8.0	27.6	701	80
	0	29.92	760	0

Fuente: REIN, Peter. *Ingeniería de la caña de azúcar*. p. 369.